INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

LA ESPECIE QUE CONQUISTÓ EL PLANETA | ENSEÑAR CIENCIAS EN EL SIGLO XXI | CAZA DE EXOPLANETAS

OCTUBRE 2015 N.º 469

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edici… ñola de Scientific American

OCEANOGRAFÍA

Olas gigantes en el Ártico

ASTRONOMÍA

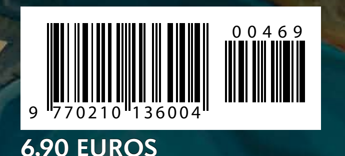
A la caza de exoplanetas gigantes

EDUCACIÓN

La enseñanza de las ciencias en el siglo XXI

LA ESPECIE QUE CONQUISTÓ EL PLANETA

¿Cuáles fueron las claves de nuestro éxito evolutivo?



6,90 EUROS



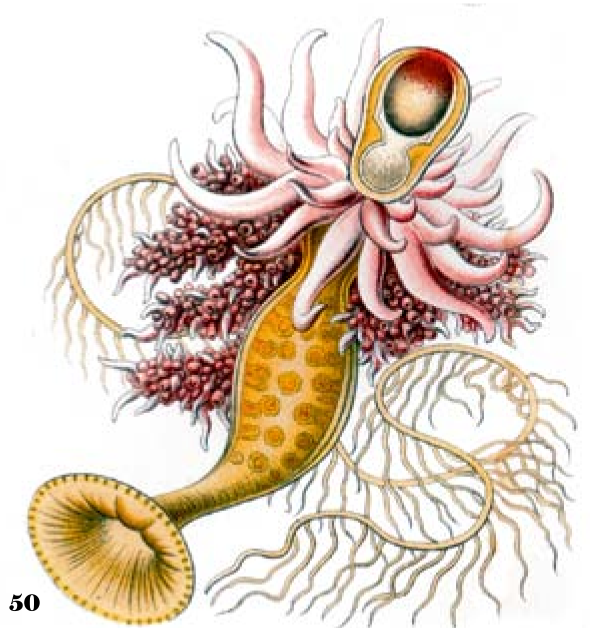
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Octubre 2015, Número 469

CORTESÍA DE G. BRAMMER/OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL (*Very Large Telescope*)

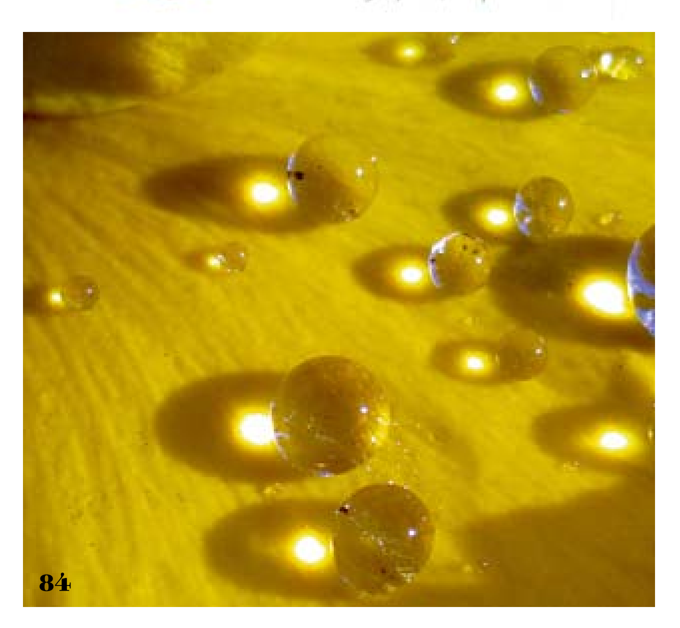
ARTÍCULOS



10



50



84

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

A lo largo de los millones de años en que ha tenido lugar la evolución humana, el planeta ha sido habitado por distintas especies de nuestro género. Pero solo una, *Homo sapiens*, logró propagarse por todo el mundo. Una nueva hipótesis plantea que dos innovaciones únicas, la extraordinaria capacidad de cooperación y las armas de proyectil, permitieron a nuestra especie tal hazaña. Ilustración de Jon Foster.



redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2015

DEMOGRAFÍA Y EDUCACIÓN

En una carta publicada en esta sección [Investigación y Ciencia, julio de 2015] a propósito del artículo «Un rompecabezas global», de Michel E. Webber [Investigación y Ciencia, febrero de 2015], Avi Ornstein defiende la necesidad de estabilizar la población mundial para garantizar la suficiencia de recursos del planeta. Webber responde que, aunque el crecimiento de la población reviste importancia, el verdadero reto lo plantea el crecimiento económico, ya que este ha provocado que la demanda de alimentos, energía y agua en todo el mundo esté aumentando más rápido que el número de habitantes. Para solucionarlo, propone una gestión inteligente de dichos recursos básicos, la cual garantice su acceso universal y evite los problemas de seguridad y sostenibilidad actuales.

Aunque el planteamiento de Webber me parece adecuado, semejante objetivo no se alcanzará si el problema no se aborda en mayor profundidad, lo que implica necesariamente favorecer la educación mundial, especialmente en las naciones en vías de desarrollo. Es al logro de dicho fin hacia donde deberían dirigirse los esfuerzos y las inversiones de los países desarrollados. La razón se apoya en la premisa socioconómica según la cual un individuo educado siempre producirá más de lo que consume. Por ello, el medio básico para paliar el problema demográfico es fomentar la educación de los ciudadanos.

Justo Aznar
Director del Instituto de Ciencias de la Vida
Universidad Católica de Valencia

EL ORIGEN DE LOS OCÉANOS

Los lectores del artículo «El origen del agua en la Tierra», de David Jewitt y Edward D. Young [Investigación y Ciencia, mayo de 2015], tal vez estén interesados en saber que los datos relativos a dos cometas en los que se ha hallado una proporción entre deuterio e hidrógeno similar a la terrestre, así como los indicios de agua en Ceres mencionados en el artículo, fueron obtenidos con el instrumento HIFI del observatorio espacial Herschel, de la ESA. (Los abajo firmantes hemos trabajado largo tiempo con este observatorio.)

La espectroscopía de alta resolución con un telescopio de ondas submilimétricas constituye una valiosa herramienta para observar cometas y asteroides y, por tanto, para estudiar el origen del agua en nuestro planeta con técnicas estadísticas, en lugar de mediante análisis de objetos individuales.

Paul Goldsmith
Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA
Pasadena, California
Darek Lis
Laboratorio de Estudios sobre Radiación y Materia en Astrofísica y Atmósferas
París

REDES DE MEMRISTORES

En «El alba de la memcomputación» [Investigación y Ciencia, julio de 2015], Massimiliano Di Ventra y Yuriy V. Pershin explican que una red de memristores (componentes electrónicos cuya resistencia se modifica en función de la cantidad de corriente que circula por ellos y que son capaces de retener dichos cambios) podría resolver en un solo paso el problema clásico de encontrar la salida de un laberinto.

Sin embargo, los autores obvian mencionar el hecho de que, para «cablear» los memristores a lo largo del laberinto —de forma que una entrada quede conectada a una salida— tendremos que visitar cada una de sus casillas y colocar un memristor allí donde haga falta. Este proceso puede obligar a recorrer una porción de laberinto mayor que la que implicaría una solución basada en un camino aleatorio o en el método clásico del «seguidor de paredes».

Dave Brumley
San Diego

Responden los autores: *Para crear un laberinto lo único que hace falta conocer es su topología; en concreto, las posiciones de las paredes y los huecos. Pero el conocimiento de dicha topología no implica saber de antemano cuál es la solución o ni siquiera que esta existe. A modo de ejemplo, consideremos el dibujo de un laberinto de la sección de pasatiempos de una revista. El lector que intente resolverlo sabrá desde el principio cuál es su topología, pero ignorará la solución y necesitará tiempo para encontrarla. El mismo principio se aplica a la tarea de intentar resolver un laberinto con una red de memristores.*



Julio 2015

Erratum corrige

En el artículo **Fundamentos matemáticos de la guerra**, de Tim Palucka [Investigación y Ciencia, julio de 2015], se menciona erróneamente que las tropas nazis emplearon la táctica de la guerra relámpago en Stalingrado en 1941. La batalla de Stalingrado tuvo lugar en 1942. La contienda de 1941 a la que hacía referencia el estudio reseñado era la invasión de la Unión Soviética.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



CONSERVACIÓN

Corales de laboratorio

La evolución asistida de los corales de la Gran Barrera podría ayudar a su salvación

Con 350.000 kilómetros cuadrados, la Gran Barrera de Coral se erige como la mayor estructura viviente del planeta. Emplazada frente a la costa noreste de Australia, alberga más de 600 corales y miles de otras especies de fauna marina. Pero su futuro se aventura funesto. En los 27 años que separan 1985 de 2012, la mitad del coral ha desaparecido. Buena parte de la mortandad es achacable al cambio climático, que ha intensificado los ciclones tropicales destructivos y ha calentado y acidificado las aguas circundantes. Los esfuerzos conservacionistas, como la creación de zonas protegidas y la mejora de la calidad del agua, no bastarán por sí solos. Para frenar la destrucción del coral, los biólogos marinos de un nuevo centro de investigación australiano, el Simulador Marino Nacional (*fotografía*), han concebido una estrategia más radical: cultivar «supercorales» capaces de prosperar en un mar cada vez más hostil.

En el próximo lustro, el equipo encabezado por la genetista Madeleine van Oppen cultivará corales preparados para afrontar el calentamiento global en algunos de los 33 tanques del Simulador Marino Nacional. Van Oppen podrá controlar con precisión la salinidad, la temperatura, la calidad y el *p*H del agua de cada tanque, de modo que podrá seleccionar los individuos que resistan los ambientes adversos. Algunos tanques reproducirán las condiciones marinas que los modelos predicen para finales de siglo. Los especímenes que mejor toleren el calor y el *p*H ácido serán cruzados para concebir una descendencia dotada con sus rasgos, en generaciones sucesivas, proceso denominado evolución asistida. Ello podría tener lugar de forma natural si los corales pudieran adaptarse con suficiente rapidez a los cambios ambientales, pero el tiempo apremia, por lo que el hombre ha decidido intervenir para acelerar la adaptación. «Las predicciones para los arrecifes coralinos son sombrías», advierte van Oppen. «Conviene explorar si la evolución asistida puede ser una herramienta factible para restaurar los arrecifes».

La evolución asistida constituye un enfoque novedoso en la conservación marina que no escapa a la controversia. Algunos expertos no ocultan su temor a que los supercorales desplacen a los corales autóctonos. Si el trabajo de van Oppen culmina con éxito, el gobierno de Australia, que financia el Simulador Marino Nacional, podría considerar el trasplante de corales de laboratorio en la Gran Barrera. La carrera contra la extinción de los arrecifes de coral ha dado comienzo.

—Annie Sneed

CORTESÍA DEL INSTITUTO AUSTRALIANO DE CIENCIAS MARINAS

ARQUEOLOGÍA

Dentista de difuntos

Incrustado en la dentadura de personas muertas hace largo tiempo, el sarro dental aporta nuevas pistas sobre la salud del hombre primitivo



Los mejores dientes que Christina Warinner puede ver en su despacho son los que llevan adheridos en el esmalte pedazos de sarro del tamaño de un guisante. Warinner no es odontóloga, pero emplea algunas de sus herramientas. Es una antropóloga de la Universidad de Oklahoma, donde, con siglos de retraso, practica limpiezas dentales a semejantes de la época vikinga y de la Edad de Piedra para reunir poco a poco detalles sobre la vida remota del hombre.

El sarro reciente, pegajoso como es, retiene todo lo que uno se lleva a la boca, y cuando se endurece encierra en su seno pedacitos de plantas, polen, bacterias, almidón, carne, carbón vegetal, fibras textiles, etcétera. En fecha reciente se ha comprobado que el sarro fosilizado constituye la mayor fuente de ADN del registro arqueológico. «Uno de los mayores inconvenientes del ADN antiguo es la escasez de material para trabajar», explica Warinner. El sarro resuelve el problema: contiene entre 100 y 1000 veces más ácidos nucleicos por miligramo que ninguna otra fuente. Una de las prioridades de su laboratorio es recopilar un inventario de ADN elaborado con el sarro hallado en cadáveres de colecciones museísticas y yacimientos arqueológicos de todo el mundo. Comienza así la búsqueda de pacientes más antiguos y variopintos que permitan averiguar cómo han cambiado la salud y los hábitos alimenticios a lo largo de la historia humana. *—Megan Gannon*

TRES PROYECTOS EN TORNO AL SARRO

DIENTES CON LECHE

Sin el cepillado regular, el sarro se acumula en los dientes y actúa como una cápsula del tiempo que conserva atrapados testimonios diminutos de la alimentación del individuo. Mucho después de que el tetrabrick de leche acabe en el cubo de la basura, la dentadura del bebedor retiene una proteína láctea extremadamente duradera y abundante llamada beta-lactoglobulina. El laboratorio de Warinner busca esta proteína en el sarro de seres humanos primitivos para averiguar por qué tantos colectivos pueden consumir leche fresca sin caer enfermos, cuando los demás mamíferos pierden la facultad de digerirla en la vida adulta. La tolerancia a los lácteos aparece en varias culturas, pero se debate el momento en que surgió en nuestra especie. El análisis del sarro puede indicar exactamente quién bebía leche en un yacimiento y de qué animal procedía: vaca, oveja o camello, entre otros. Este planteamiento acaba con la ambigüedad de otros métodos arqueológicos, como la búsqueda de grasas propias de la leche en restos de cerámica antigua. El año pasado, el equipo de Warinner halló la primera prueba directa de consumo de leche al secuenciar beta-lactoglobulinas en muestras de sarro que se remontan a la Edad de Bronce en algunas regiones de Europa y el sudoeste de Asia. Ahora los investigadores están examinando muestras de sarro del Neolítico, período en que el hombre comenzó a domesticar animales.

LIMPIADOR DE PALADAR

Por pulcros que seamos con nuestra higiene bucal, todos acogemos a cientos de bacterias distintas en la superficie de la dentadura. El año pasado, Warinner y sus colaboradores descubrieron que los esqueletos de un cementerio medieval de Alemania presentaban microbiomas bucales notablemente modernos a pesar de los cambios en los hábitos higiénicos y alimenticios sobrevenidos en el último milenio. El sarro medieval contenía bacterias relacionadas con la periodontitis, una enfermedad frecuente de las encías que provoca la caída de los dientes. A fin de conocer mejor el momento en que la especie humana comenzó a sufrir esas afecciones dentales —y su vínculo con factores como la alimentación, el ambiente y la cultura—, el laboratorio de Warinner está raspando el sarro de esqueletos que se remontan hasta la Edad de Piedra, así como del pariente más cercano de nuestra especie, el chimpancé.

LLENAR LOS AGUJEROS

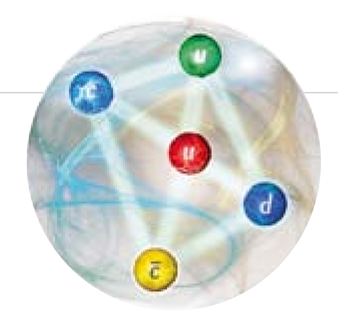
De los huesos sepultados en el suelo helado a veces se obtiene material genético muy bien conservado. El genoma completo más antiguo secuenciado hasta la fecha (700.000 años) procede de un hueso de la extremidad de un équido desenterrado del permafrost del noroeste de Canadá. El genoma humano más antiguo secuenciado (45.000 años) se extrajo de un fémur hallado en Siberia. Pero no todas las muestras biológicas proceden de congeladores naturales. Por su gran dureza, mayor que la de los huesos porosos, el sarro densamente mineralizado podría convertirse en la fuente ideal de ADN intacto, tanto en las regiones heladas como fuera de ellas. Hasta el momento, el equipo de Warinner ha conseguido extraer ADN y proteínas de muestras de sarro de hasta 100 siglos de antigüedad. Ahora trabajan para obtener material genético más antiguo aún. El ejemplo más antiguo de sarro conservado que Warinner conoce supera los ocho millones de años y procede de un antepasado fósil del orangután.

THOMAS FUCHS

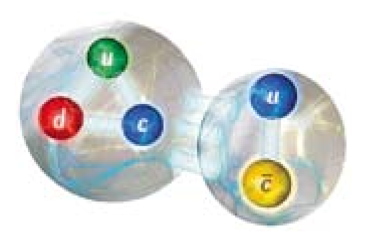
FÍSICA DE PARTÍCULAS

Pentaquarks, el último descubrimiento del LHC

El hallazgo de un nuevo tipo de partícula formada por cinco quarks demuestra que estos constituyentes elementales pueden organizarse de un modo nunca antes visto



Representación esquemática de las dos configuraciones posibles del nuevo estado compuesto por cinco quarks.



El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN ya puede sumar un descubrimiento más a la lista que inauguró el bosón de Higgs. En los datos registrados por el acelerador apareció hace poco un pentaquark: un nuevo tipo de partícula formada por cinco quarks, los constituyentes fundamentales del protón y el neutrón. El hallazgo, esperado desde hace tiempo (su existencia había sido predicha hace más de cincuenta años), aporta valiosa información sobre las distintas maneras en que puede organizarse la materia para dar forma al mundo que conocemos.

Se conocen cientos de partículas integradas por quarks. Hasta ahora, sin embargo, todas ellas podían clasificarse en uno de dos grandes grupos: bariones, formados por tres quarks (como el protón y el neutrón), y mesones, compuestos por un quark y un antiquark. Hace tiempo que esta escueta taxonomía tenía perplejos a los físicos, ya que la teoría matemática que describe el comportamiento de los quarks no prohíbe que existan otras combinaciones. En los últimos años, algunos grupos han observado indicios de otros agregados exóticos (como la partícula Z_c(3900), compuesta por dos quarks y dos antiquarks), pero su interpretación es aún objeto de polémica, señala Eric Swanson, físico de la Universidad de Pittsburgh. Y las supuestas detecciones de pentaquarks anunciadas hace una década resultaron ser falsos positivos.

La señal observada ahora por el LHC no parece dejar lugar a dudas. «Llevo treinta años en esto y he visto ir y venir muchos datos», apunta Swanson, quien no participó en el descubrimiento. «Los datos son claros y no les veo ninguna otra explicación convincente.» Los investigadores del LHC publicaron su hallazgo el pasado mes de agosto en *Physical Review Letters*.

Por el momento, los resultados no dejan claro si los cinco quarks que componen la nueva partícula se hallan todos estrechamente unidos entre sí o si, por el contrario, se trata más bien de una «molécula subatómica» formada por una unión débil entre un barión y un mesón. Los futuros experimentos del LHC, que el pasado mes de junio reanudó sus operaciones a una energía mucho mayor que la empleada hasta ahora, tal vez permitan dilucidar la naturaleza de la nueva partícula o incluso crear otras del mismo tipo, señala Sheldon Stone, físico de la colaboración autora del hallazgo.

En cualquier caso, la mera confirmación de la existencia de pentaquarks demuestra que la variedad de partículas observada hasta ahora en la naturaleza y en los experimentos de física de altas energías no hace justicia a la riqueza del mundo subatómico. El descubrimiento ha reavivado la curiosidad por saber qué partículas exóticas podrían aparecer en el futuro.

—Maria Temming

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Matrifagia, el sacrificio supremo de una araña aterciopelada

Cuando las crías devoran a su propia madre

La maternidad implica de ordinario sacrificio, pero en la mayoría de las especies ese altruismo es temporal. A la puesta le sigue el nacimiento y después el abandono del nido, momento en que la prole inicia la vida por su cuenta. No ocurre así con *Stegodyphus lineatus,* una araña aterciopelada que habita en el desierto del Néguev, Israel. *S. lineatus* practica la forma más radical y cruenta de devoción materna: la matrifagia, en que la madre acaba devorada por su progenie.



Los entomólogos llevan años preguntándose acerca de los pormenores escabrosos de esa estrategia de cuidado. ¿La devoran tal cual o ella prepara sus adentros para facilitar la tarea? Al parecer, sucede lo segundo. La degradación de los tejidos maternos comienza antes de que las crías nazcan, según la investigación publicada en *Journal of Arachnology*. «Todo sufre una profunda remodelación, es como si estuviera planeado de antemano», asegura Mor Salomon, entomólogo por entonces en la Universidad Hebraica de Jerusalén.

Salomon y sus colaboradores han examinado al microscopio cortes transversales de hembras adultas en todos los estadios del proceso reproductivo. Los tejidos comenzaban a mostrar leves signos de degradación justo después de la puesta del ovisaco. Y al cabo de 30 días, cuando las crías nacían, la degeneración se aceleraba. «Si se apreciaba con nitidez el límite de un órgano, la fotografía siguiente mostraba una imagen borrosa, y la siguiente, su total desaparición», explica Salomon. La descomposición permite a la araña regurgitar pedazos del intestino licuado, con los que nutre a sus crías en crecimiento.

Apenas nueve días después de la eclosión, la madre detiene la regurgitación y las jóvenes arañas se abalanzan sobre ella —aún viva— para darse el festín final. Succionan todos los líquidos corporales y después abandonan el nido, dejando tras de sí el caparazón del exoesqueleto. Un año después, las hembras maduras rendirán cuentas del mismo modo: entregando su cuerpo a la generación venidera.

—Rachel Nuwer

MOONRUNNER DESIGN (*arriba*); THOMAS FUCHS (*abajo*)

MATERIALES

El mayor competidor del grafeno

Un nuevo material, el fosforeno, podría mejorar la eficiencia de los transistores

Hoy por hoy, el grafeno encabeza la lista de los materiales favoritos de los ingenieros. Formado por capas de carbono de un solo átomo de espesor, exhibe una resistencia y flexibilidad fabulosas y unas propiedades electrónicas únicas. Ello ha propiciado su uso en aplicaciones tan variadas como cargadores para móviles o filtros de agua. Sin embargo, hay un aspecto que aún deja que desear: no es semiconductor. Y aunque se siguen concibiendo nuevas formas de manipularlo a fin de que pueda emplearse para fabricar transistores (los diminutos interruptores internos que hacen funcionar nuestros aparatos electrónicos), hace poco que los investigadores han comenzado a prestar atención a otro material de estructura semejante: el fosforeno, láminas de fósforo negro de un único átomo de grosor.

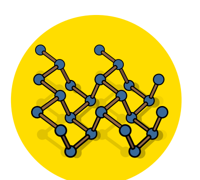
A altas presiones, el fósforo se convierte en fósforo negro, un material con propiedades superconductoras descubierto hace un siglo. En 2014, un equipo de investigadores de la Universidad Purdue logró sintetizar una capa de espesor monoatómico. Desde entonces cada vez más grupos se han volcado a estudiar las propiedades del nuevo material: solo en este año se han publicado más de 400 artículos que lo mencionan.

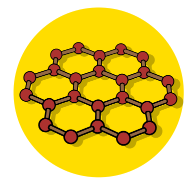
Según Thomas Szkopek, especialista en materiales bidimensionales de la Universidad McGill, el entusiasmo obedece al potencial del fosforeno para sustituir a otros materiales menos eficientes usados en electrónica. El fósforo negro es un «verdadero semiconductor», señala el Szkopek, en el sentido de que resulta posible activar y desactivar su capacidad para conducir la corriente eléctrica. En particular, puede modificarse cuánta energía fluye por el material a lo largo de muchos órdenes de magnitud. Semejante control ayuda a minimizar la corriente disipada, lo que en principio permitiría fabricar transistores mucho más eficientes que los actuales (la eficiencia de los transistores ordinarios de silicio es en torno a un millón de veces menor que la que impone el límite termodinámico).

Con todo, el nuevo material presenta varias características que dificultan su empleo en los transistores. En cualquier caso, si los investigadores no consiguen sortear esas pegas, aún podría tener otros usos. Como es menos frágil que el silicio, resultaría útil en la electrónica flexible. Y, dado que el fósforo emite luz, podría servir para fabricar láseres o ledes.

Pero tal vez la mejor aplicación del fosforeno se halle en algún dispositivo aún por inventar. «Existe un interés creciente en todo el mundo por los nuevos materiales bidimensionales, ya que ofrecen una combinación de propiedades única», explica Szkopek. De hecho, otras estructuras parecidas esperan su turno: el germaneno, el siliceno y el estaneno ya están a la cola.

—Alexandra Ossola





PROPIEDAD	FOSFORENO	GRAFENO
Estructura	Hexágono fruncido	Hexágono regular
Conductividad	Fácil de activar o desactivar el paso de la corriente	Fugas de corriente en los interruptores
Flexibilidad	Muy flexible; compresible a causa de su estructura fruncida	Muy flexible
Pureza	Difícil de separar en capas monoatómicas, aunque su calidad seguramente mejorará	Fácil de separar en capas monoatómicas; pocas impurezas
Sensibilidad	Reacciona con la luz, el agua y el aire; en la electrónica de uso cotidiano necesitaría un recubrimiento protector	Estable en condiciones normales; no se necesita un recubrimiento adicional
Otras aplicaciones	Láseres, sensores de *p*H, electrónica flexible	Baterías, pantallas, paneles solares, implantes biónicos

DAISY CHUNG (*fosforeno y grafeno*); SEO/BIRDLIFE (*ornitólogos*)

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de octubre
Ciencia básica, ciencia práctica
Luis Álvarez-Gaumé, CERN
Teresa Rodrigo, Universidad de Cantabria
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es > Agenda

15 de octubre
Ciencia y tecnología de la luz en la vida cotidiana
Francisco Miguel Martínez Verdú, Universidad de Alicante
Sede Universitaria Universidad de Alicante
www.luz2015.es > Agenda

EXPOSICIONES

Excreta. Una exposición (in)odora, (in)colora e (in)sípida
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es

OTROS

3 de octubre
Maratón ornitológico
Organizado por SEO/BirdLife y la Sociedad de Ciencias Aranzadi
País Vasco
www.seo.org



Del 7 al 9 de octubre - Encuentro internacional sobre comunicación
100xCiencia
Santa Cruz de La Palma
www.100xciencia.com

23 y 24 de octubre
III Jornadas de divulgación innovadora
Centro Etopia para el Arte y la Tecnología
Zaragoza
www.divulgacioninnovadora.com

29 de octubre - Jornada
Avances en el estudio y recuperación de suelos contaminados
CIEMAT
Madrid
www.bioxisoil.eu

ESPACIO

El impacto de pequeños asteroides contra la Tierra

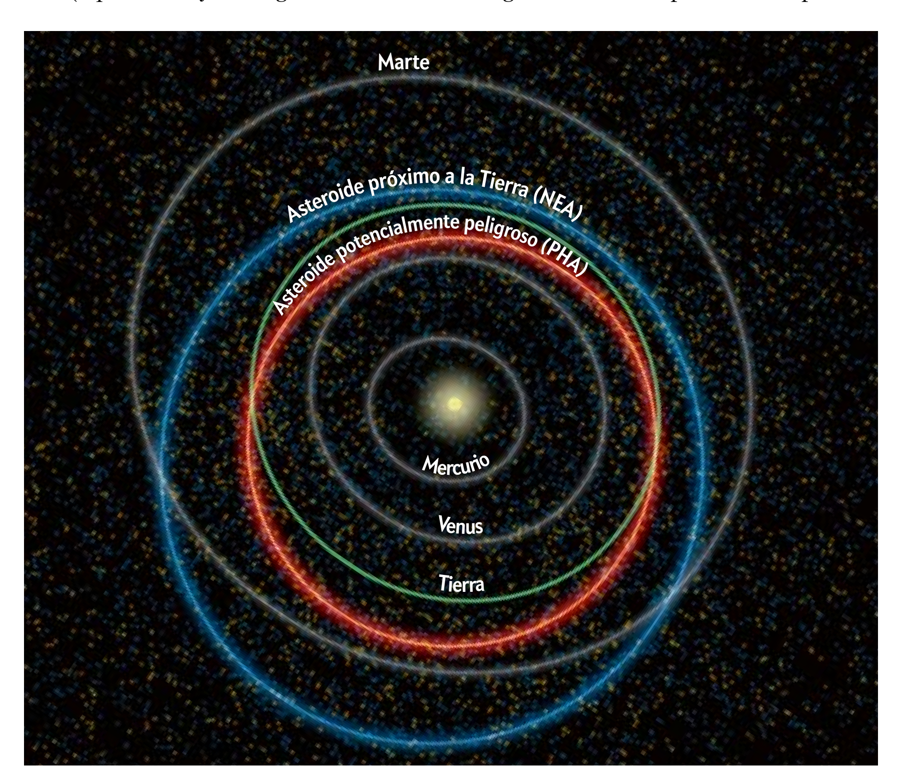
¿Cuánto nos protege la atmósfera de la caída de cuerpos rocosos provenientes del espacio? Nuevos modelos permiten estudiar aquellas excepciones que podrían suponer un riesgo a escala local

JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ Y MANUEL MORENO IBÁÑEZ

Hace tiempo que los expertos dedican grandes esfuerzos a prever el impacto de asteroides contra nuestro planeta. En los últimos años, los diferentes programas de seguimiento han detectado 1608 asteroides potencialmente peligrosos (PHA, por sus siglas en inglés), 154 de los cuales presentan un diámetro superior al kilómetro. Además del seguimiento de tales objetos, otro reto consiste en monitorizar grandes bólidos meteóricos para identificar y cuantificar el peligro asociado a sus fragmentos. La Unión Astronómica Internacional denomina a estas rocas «meteoroides», las cuales tienen, por definición, un diámetro máximo de diez metros (aquellas mayores siguen llamándose asteroides). Por lo general, la atmósfera terrestre actúa como un eficiente escudo protector contra pequeños asteroides. Sin embargo, en ocasiones estos cuerpos logran abrirse paso hasta la superficie terrestre, llegando incluso a excavar un cráter. El 15 de septiembre de 2007, por ejemplo, una roca de al menos tres metros de diámetro cayó en la región de Carancas, en Perú, donde excavó un cráter de casi 15 metros.

Desde nuestro grupo de investigación en el Instituto de Ciencias del Espacio, en Barcelona, contribuimos al seguimiento de asteroides potencialmente peligrosos y coordinamos esfuerzos para estudiar el riesgo asociado al impacto de cuerpos menores. Un campo de creciente interés persigue establecer una relación entre estas rocas y los asteroides próximos a la Tierra (NEA). Sin embargo, tales asociaciones no resultan fáciles de obtener, ya que los objetos de menor tamaño se encuentran sometidos a todo tipo de procesos que desestabilizan sus órbitas.

A pesar de todo, hace poco descubrimos que el meteorito Annama, caído el 19 de abril de 2014 en la península de Kola, en Rusia, presentaba una órbita asociada a 2014 UR116, un asteroide potencialmente peligroso de unos 400 metros de diámetro. Con anterioridad, y a partir de estudios realizados desde la Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (www.spmn.uji.es), habíamos encontrado un vínculo entre meteoroides registrados en su fase de bólido (el momento en que entran en la atmósfera y generan un rastro brillante) y varios asteroides, como el potencialmente peligroso 2002 NY40, de unos 800 metros de diámetro.



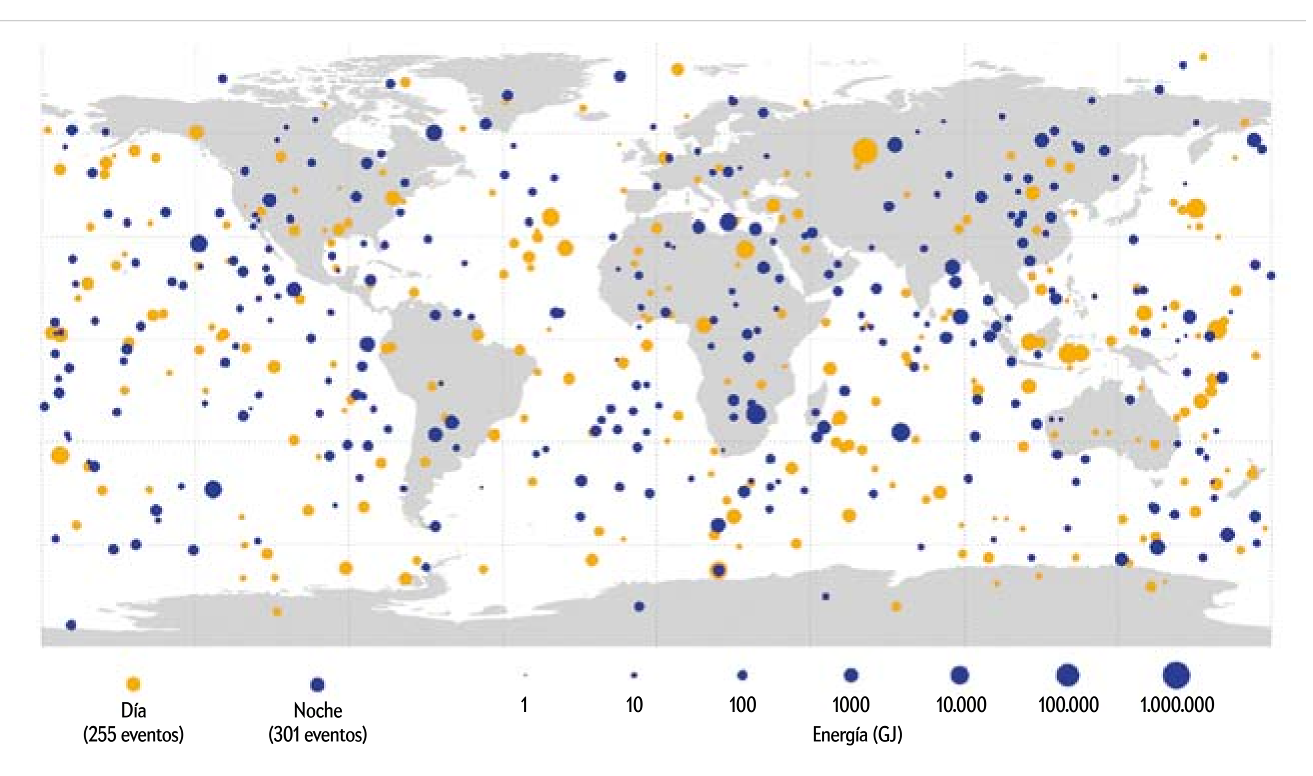
VECINOS INQUIETANTES: **Algunos asteroides orbitan más cerca de la Tierra de lo que nos gustaría. Esta imagen muestra la trayectoria típica de un asteroide cercano a la Tierra (NEA, *azul*) y la de uno potencialmente peligroso (PHA, *rojo*). Hasta la fecha se han detectado más de 1600 de estos últimos. Además del riesgo de colisión contra ellos, sus fragmentos también representan un peligro potencial.**

NASA/JPL-CALTECH

Cuantificar el riesgo

La existencia de tales asociaciones sugiere que el origen de estos objetos menores podría hallarse en fragmentaciones ocurridas durante la aproximación de algunos asteroides a los planetas interiores del sistema solar. De hecho, la caída el 15 de febrero de 2013 del meteorito de Cheliábinsk, producido por un asteroide de unos 18 metros de diámetro, coincidió temporalmente con la aproximación a la Tierra del asteroide cercano 2012 DA14. Aunque los dos objetos seguían órbitas muy diferentes, ¿pudieron ambos ser fruto de un encuentro cercano previo, en el que un asteroide mayor se desgajó en varios fragmentos?

Se antoja difícil demostrar tal hipótesis a partir de la simulación de las múltiples posibilidades. Pero, dado que numerosos NEA presentan una estructura de «pila de escombros», sí parece posible que la acción diferencial de un campo gravitatorio sea capaz de disgregarlos. Además, se han descubierto varios asteroides cuya rápida



LLUVIA PERSISTENTE: Localización de la entrada atmosférica de pequeños asteroides (de entre 1 y 20 metros de diámetro) registrados entre 1994 y 2013. El color de cada evento indica cuándo se produjo; el tamaño, la energía óptica radiada en gigajulios (GJ; la bomba atómica que cayó sobre Hiroshima liberó una energía de unos 63.000 GJ). Los datos suponen una media de unos 28 impactos al año.

rotación los pone en el límite de ruptura, lo que también incrementaría la frecuencia de impacto contra la Tierra de objetos de pocas decenas de metros. En todo caso, fuese cual fuese el origen del meteorito de Cheliábinsk, el evento ejemplifica con claridad el peligro local que suponen la onda de choque y la radiación de un superbólido. Aunque el objeto explotó a una altitud de unos 30 kilómetros y la nube de gas y polvo penetró en la atmósfera hasta una altitud de unos 26 kilómetros, la energía liberada, equivalente a la de varias bombas atómicas, provocó cuantiosos daños materiales en un área de cientos de kilómetros cuadrados.

Así pues, parece necesario desarrollar herramientas para predecir el grado de profundización de estos objetos en la atmósfera y evaluar, con la mayor exactitud posible, el riesgo que conllevan. Hace poco, junto con Maria I. Gritsevich, del Instituto Finlandés de Investigación Geoespacial y la Academia Rusa de las Ciencias, hemos logrado ajustar un sistema de ecuaciones diferenciales dependiente de dos parámetros adimensionales (relacionados con las dimensiones del objeto, su velocidad de entrada y otras características físicas), el cual permite predecir la altitud a la que estos meteoroides profundizarán en la atmósfera.

Nuestro trabajo, que apareció publicado a principios de este año en la revista *Icarus*, comparaba las predicciones del modelo con las trayectorias de decenas de «bolas de fuego» incluidas en la red fotográfica MORP, la cual monitorizó el flujo de bólidos sobre Canadá entre 1970 y 1985. Las predicciones muestran un acuerdo excelente con los datos empíricos, algo nunca logrado con anterioridad. Tales resultados suponen un paso adelante en la descripción del proceso de deceleración de meteoroides en la atmósfera.

El modelo permite también obtener otras características sobre el objeto que se desea estudiar. El calentamiento que este sufre debido a la fricción con la atmósfera hace que sus capas exteriores se fundan y se evaporen durante la fase conocida como «ablación», la cual origina la bola de fuego y causa la progresiva pérdida de masa que experimenta la roca. A partir del coeficiente de ablación (un parámetro que caracteriza el proceso), resulta posible determinar otros datos de gran relevancia, como la masa perdida por el meteoroide en su deceleración atmosférica o su composición aproximada.

Por más que la dinámica del vuelo atmosférico de estas rocas revista gran complejidad, estamos cada vez más cerca de conseguir un modelo que recree con exactitud su proceso de entrada. Esperamos que, en un futuro cercano, estos avances permitan predecir y cuantificar con mayor detalle el riesgo asociado a estos temibles proyectiles.

—Josep M. Trigo Rodríguez
y Manuel Moreno Ibáñez
Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)
e Instituto de Estudios Espaciales
de Cataluña

PARA SABER MÁS

Asteroid 2002NY40 as a source of meteorite-dropping bolides. J.M. Trigo-Rodríguez et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 382, págs. 1933-1939, 2007.
New methodology to determine the terminal height of a fireball. M. Moreno-Ibáñez, M. Gritsevich y J. M. Trigo-Rodríguez en *Icarus*, vol. 250, págs. 544-552, 2015.
Orbit and dynamic origin of the recently recovered Annama's H5 chondrite. J. M. Trigo-Rodríguez et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 449, págs. 2119-2127, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Asteroides y cometas como amenaza para la Tierra. A. Carusi en *IyC*, septiembre de 1995.
El misterio de Tunguska. L. Gasperini, E. Bonatti y G. Longo en *IyC*, septiembre de 2008.

TECNOLOGÍA MILITAR

¿Estamos al borde de una guerra espacial?

Estados Unidos, China y Rusia están ensayando nuevos y polémicos medios para librar un conflicto armado en el espacio

LEE BILLINGS

Puede argumentarse que el escenario bélico más inquietante en estos momentos no es el estrecho de Taiwán, la península de Corea, Irán, Israel, Cachemira ni Ucrania. De hecho, no se encuentra en ningún punto del globo, sino en el espacio. Hace tiempo que esa zona de nadie viene propiciando la gestación de una carrera armamentista en toda regla, solo que nadie la llama así.

En la actualidad hay unos 1300 satélites activos en órbita. Entre otras tareas, estos se encargan de mantener las comunicaciones mundiales, la navegación por GPS o los pronósticos meteorológicos. Para las naciones que dependen de un selecto conjunto de ellos para la guerra moderna, el espacio orbital se ha convertido en la posición militar más codiciada de todas. Por el momento, EE.UU. se ha erigido en ella como rey indiscutible. Pero China y Rusia han decidido desafiar con determinación la hegemonía espacial estadounidense, para lo que han desarrollado ambiciosos programas de defensa y exploración propios. Semejante forcejeo bien podría desencadenar un conflicto que socavase la infraestructura espacial de todo el planeta. Y, aunque la contienda bélica empezase ahí arriba, podría acabar trasladándose fácilmente a la superficie.

En declaraciones al Congreso de EE.UU. este mismo año, James Clapper, director de la inteligencia nacional estadounidense, se hizo eco de la preocupación de muchos altos cargos de su Gobierno por la creciente amenaza que suponía que China y Rusia estuviesen desarrollando medios para sabotear satélites militares estadounidenses críticos. En particular, Clapper mencionó la existencia de documentos militares chinos que subrayaban la «necesidad de interferir, dañar y destruir» satélites estadounidenses, e hizo referencia a una serie de ensayos de misiles antisatélite chinos que comenzó en 2007.

La última de esas pruebas tuvo lugar el 23 de julio del año pasado. Al igual que las precedentes, consistió en el lanzamiento de un misil que podría usarse como «arma cinética» para golpear y destruir satélites. Los responsables chinos insisten en que tales ensayos son pacíficos y que se enmarcan en un contexto de defensa antimisiles y experimentación científica, pero los expertos externos lo dudan. En mayo de 2013, uno de esos ensayos conmocionó de manera especial a la inteligencia estadounidense: un misil alcanzó una altitud de 30.000 kilómetros, acercándose así al dominio de las órbitas geosíncronas, aquellas en que los satélites orbitan con la misma velocidad con que rota la Tierra, lo que los mantiene anclados sobre la misma posición del planeta. Esas órbitas albergan varios satélites estratégicos estadounidenses; entre ellos, los que vigilan el lanzamiento de misiles nucleares, así como otros muchos con fines comerciales y de comunicaciones.

EE.UU. no ha permanecido de brazos cruzados. Poco después del ensayo chino de 2013, levantó el secreto sobre algunos detalles de su Programa para el Conocimiento Situacional del Espacio Geosíncrono (GSSAP), un grupo de cuatro satélites que vigilarían las órbitas altas y que incluso podrían aproximarse a otros para inspeccionarlos de cerca. Las dos primeras naves fueron puestas en órbita en julio de 2014. «Se trataba de un programa "en negro"; es decir, de uno que ni siquiera existía oficialmente», explica Brian Weeden, analista de seguridad y antiguo oficial de la Fuerza Aérea de EE.UU. que estudió y contribuyó a hacer público el ensayo chino. «Más que nada, el secreto se levantó para enviar el mensaje de que, si alguien se propone hacer algo sospechoso en el cinturón geosíncrono, nosotros estaremos ahí para verlo.»

Mientras tanto, el Gobierno de Barack Obama ha presupuestado no menos de 5000 millones de dólares para aumentar la capacidad defensiva y ofensiva del programa espacial estadounidense durante los próximos cinco años. Un enemigo podría volar un satélite con un misil, pero los mandos y la tecnología también deberían prepararse para prevenir ataques mucho más sutiles pero inocuos a primera vista. Por ejemplo, un vehículo espacial podría acercarse a un satélite y rociar sus dispositivos ópticos con pintura, arrancarle las antenas de comunicaciones o desestabilizar su órbita. También podría emplear láseres para inutilizar temporal o permanentemente los componentes de un satélite (en particular, sus delicados sensores), así como ondas de radio o de microondas para interferir o secuestrar las transmisiones desde o hacia los con-



ESCALADA BÉLICA: El desarrollo de armas antisatélite, como los misiles mostrados en esta recreación artística, está conduciendo a una carrera armamentista para controlar el espacio orbital, una zona de enorme importancia estratégica.

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

troladores en tierra. Los mandos de la Defensa estadounidense quieren estar listos para cualquier eventualidad.

Iniciativas militares aparte, EE.UU. también busca apaciguar el conflicto por medios diplomáticos, si bien hasta ahora tales esfuerzos han sido en vano. A finales de julio, un largamente esperado debate en las Naciones Unidas se estancó por completo en un borrador elaborado por la Unión Europea para establecer un código de conducta en el espacio, ya que a él se opusieron Rusia, China y otros países; entre ellos, Brasil, India, Sudáfrica e Irán. El fracaso de las conversaciones ha dejado en el limbo las soluciones diplomáticas, lo que probablemente conducirá a años de discusiones en la Asamblea General de las Naciones Unidas.

Al final, los restos de un satélite derribado —y no el ataque inicial— podrían convertirse en la mayor amenaza para la delicada infraestructura orbital del planeta. Los satélites vuelan a velocidades de miles de kilómetros por hora, por lo que incluso el impacto contra un objeto del tamaño de una canica puede inutilizar o destruir por completo un vehículo espacial de miles de millones. Y una colisión semejante podría generar una metralla aún peor, con el riesgo de causar una cascada de escombros que transformaría la órbita terrestre en una carrera de demolición que duraría siglos.

Sin una vigilancia y protocolos internacionales rigurosos, el peligro de colisiones accidentales e impactos de residuos seguirá aumentando a medida que más naciones pongan satélites en órbita. Y un mayor riesgo de accidentes incrementará la posibilidad de que uno de ellos se confunda con un ataque deliberado, en un escenario ya de por sí muy tenso y lleno de intrigas.

—Lee Billings
Periodista científico

PARA SABER MÁS

Guerra espacial. Theresa Hitchens en *IyC*, mayo de 2008.

BIOLOGÍA MOLECULAR

Regulación hormonal de la metamorfosis en los insectos

Las hormonas responsables de este proceso están controladas por una compleja red de reacciones. Hace poco se ha descubierto un nivel aún más fino de este entramado molecular

XAVIER BELLÉS

La metamorfosis de los insectos, por la que un individuo juvenil se transforma en adulto capaz de volar y de reproducirse, es un fenómeno que ha fascinado al hombre desde el principio de la historia. Desde los antiguos egipcios, que tenían una concepción mítica de la metamorfosis, hasta Darwin, para quien representó un fenómeno difícil de encajar en su teoría de la evolución biológica y la selección natural. Hoy en día, elucidar los mecanismos que regulan la metamorfosis sigue siendo uno de los retos que se plantea la entomología moderna.

A mediados del siglo xx se estableció que en el proceso intervienen dos tipos de hormonas, las de muda y las juveniles. Las primeras, cuyo prototipo es la ecdisona, inducen las mudas que permiten al individuo aumentar su tamaño a través de varias fases juveniles (sean de ninfa, de larva o de pupa) antes de alcanzar el estado adulto. Las segundas, cuya forma más común es la hormona juvenil III, ejercen un papel represor de la metamorfosis. Así, cuando el individuo produce ambas hormonas a la vez, adopta una nueva forma juvenil; solo cuando la hormona juvenil deja de producirse, la muda pasa a ser metamórfica y el insecto se transforma en adulto.

Sin embargo, saber que la regulación de la metamorfosis depende de dos hormonas y conocer la función de cada una de ellas no significa entender cuáles son los mecanismos reguladores de su actividad. En último término, las hormonas inducen una respuesta funcional, pero su acción depende de una serie de factores (principalmente proteínas) que transducen la señal hormonal, esto es, la transmiten a otra molécula. Se produce así un conjunto de reacciones moleculares encadenadas, que empieza por la unión de la hormona con el receptor y termina por la activación de los genes que codifican las proteínas que construirán el insecto adulto. En los últimos años se han logrado avances muy importantes en el conocimiento de los mecanismos que regulan las vías de señalización de la ecdisona y la hormona juvenil.

La activación de las hormonas

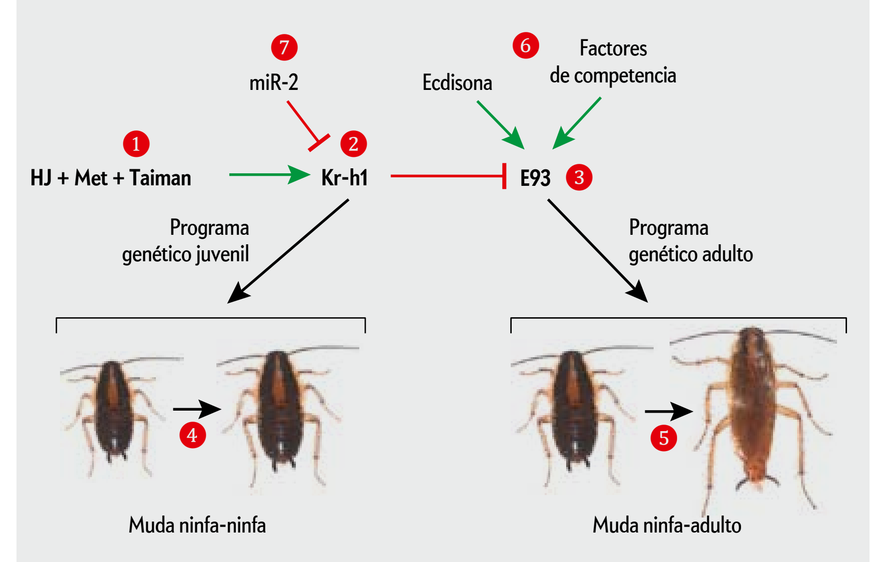
Las investigaciones realizadas en la última década del siglo xx mostraron que la vía de señalización de la ecdisona comienza con la interacción de esta con su receptor, el cual consiste en una combinación de dos factores de transcripción: el receptor de ecdisona (EcR) y la proteína ultraespiráculo (USP). El complejo ecdisona+EcR+USP se une al elemento de respuesta hormonal del gen diana y activa su transcripción.

Por otro lado, en los primeros años del siglo xxi se confirmó que el receptor de la hormona juvenil es la proteína de resistencia al metopreno (Met). De manera análoga a como lo hacen EcR y USP en la recepción de la ecdisona, el receptor de la hormona juvenil es un complejo formado por Met y otra proteína de la misma familia denominada Taiman. Desde el punto de vista funcional, se ha observado que cuando se silencia de modo experimental la expresión de Met en individuos juveniles, los insectos desarrollan de modo prematuro caracteres adultos, lo cual indica que Met es imprescindible para transducir la señal inhibidora de la metamorfosis de la hormona juvenil.

El elemento de la vía de señalización de la hormona juvenil mejor caracterizado y que se sitúa a continuación de Met es el factor de transcripción homólogo 1 de Krüppel (Kr-h1). Mientras se produce hormona juvenil, el gen de Kr-h1 se expresa continuamente, pero cuando aquella deja de producirse al principio de la fase premetamórfica (la que lleva a la forma adulta), la expresión de Kr-h1 desciende bruscamente hasta valores inapreciables. Esta caída brusca resulta esencial para

MOLÉCULAS QUE CONTROLAN LA ACTIVIDAD HORMONAL

La metamorfosis de los insectos está regulada sobre todo por dos hormonas: la ecdisona, que promueve las mudas sucesivas, y la hormona juvenil, que evita que el insecto adquiera su forma adulta definitiva. A lo largo de las distintas mudas del individuo juvenil intervienen ambas hormonas; solo cuando la hormona juvenil deja de actuar, el insecto entra en la fase adulta. Una serie de reacciones encadenadas, o vías de señalización, controlan la acción de ambas moléculas. La principal de ellas es la vía MEKRE93, o Met-Kr-h1-E93, según se ilustra abajo para la cucaracha *Blattella germanica*.



La hormona juvenil (HJ) se une a su receptor Met y este a la proteína Taiman (1). Se forma así un complejo molecular que induce la expresión del factor de transcripción Kr-h1 (2), el cual, al reprimir la expresión del factor E93 (3), un desencadenante de la metamorfosis, evita que esta se produzca; se mantiene, por tanto el programa juvenil y el paso de una muda juvenil a otra (muda ninfa-ninfa) (4). Cuando la HJ deja de producirse, decae la expresión de Kr-h1, se activa E93 y se desarrolla la forma adulta (muda ninfa-adulto) (5). La expresión de E93 depende de la ecdisona y de unos factores de competencia aún por elucidar, pero que seguramente están determinados por un umbral de tamaño mínimo corporal o de determinados tejidos (6). La molécula miR-2, un microARN, añade un nivel más fino de regulación al eliminar los transcritos de Kr-h1 (con lo que la proteína correspondiente cae en picado) en la fase que lleva a la forma adulta (7). (Las líneas terminadas en una flecha indican un efecto promotor; las terminadas en una barra, un efecto inhibidor.)

que se inicie la metamorfosis. Los experimentos han revelado que la supresión de la expresión de Kr-h1 en fases juveniles conduce a la formación precoz del adulto, lo cual indica claramente que dicho factor transduce las propiedades represoras de la metamorfosis de la hormona juvenil.

Un eje molecular fundamental

Las funciones de Met como receptor de la hormona juvenil, y de Kr-h1 como represor de la metamorfosis al transducir la señal hormonal inmediatamente después de Met, han sido demostradas en varias especies de insectos, desde cucarachas hasta moscas. Ello indica que Met-Kr-h1 es un eje ancestral y universal en la regulación represora de la metamorfosis de estos artrópodos. Pero ¿cuáles son los factores regulados por Kr-h1? La respuesta la proporciona el factor E93, cuya implicación en la metamorfosis fue descrita en 2014 por los grupos de David Martín y Xavier Franch de nuestro instituto.

En concreto, los investigadores comprobaron que al suprimir la expresión de E93 en la última fase ninfal de la cucaracha *Blattella germanica*, los individuos mudaban a una fase ninfal adicional, en lugar de adquirir la forma adulta. Cuando realizaron el mismo experimento en la pupa del coleóptero *Tribolium castaneum*, el individuo mudaba a una nueva pupa, y si se hacía en la pupa de *Drosophila melanogaster*, el individuo moría sin alcanzar la fase de adulto. El factor E93, pues, es un factor clave en la regulación de la metamorfosis, ya que puede definirse como el desencadenante propiamente de esta.

Especialmente interesante en el contexto de la regulación general de la metamorfosis es el hecho, descubierto en nuestro grupo, de que Kr-h1 reprime la expresión de E93. Así, en las fases juveniles, la hormona juvenil unida a Met induciría la actividad de Kr-h1 y este reprimiría la de E93, lo que impediría la transformación en adulto. Esta tendría lugar solo cuando dejase de producirse la hormona juvenil, cayese la expresión de Kr-h1 y se disparase la expresión de E93. El eje Met-Kr-h1-E93, que hemos denominado MEKRE93 para abreviar, es, pues, la vía de señalización universal que regula cuándo se pone en marcha la metamorfosis en los insectos.

La importancia de los microARN

El establecimiento del eje MEKRE93 ha representado un hito importante en el estudio de la regulación de la metamorfosis, pero después se han realizado otros descubrimientos que han contribuido a desvelar nuevos detalles del eje. Algunos de estos, en apariencia insignificantes, han resultado desempeñar un papel crucial.

Tal es el caso de la contribución de los microARN a la regulación de la vía MEKRE93, un hallazgo publicado hace poco por nuestro grupo. Los microARN son moléculas de ARN cortas (formadas por unos 20 nucleótidos) y no codificantes que pueden unirse a un ARN mensajero (ARNm) complementario y bloquear su traducción a proteína, con lo cual la función ejercida por esta última deja de producirse. Mediante este mecanismo de acción relativamente simple, se ha demostrado que los microARN constituyen un nivel importante de regulación de la expresión génica en un número creciente de procesos biológicos.

En el año 2009, nuestro grupo eliminó la expresión de todos los microARN en *B. germanica* mediante el silenciamiento génico de la enzima Dicer-1, que cataliza su formación. Los individuos experimentales no realizaron la metamorfosis, con lo que se nos plantearon dos preguntas clave: qué tipo concreto de microARN se hallaba implicado y qué proteína regulaba este. Tras seis años de investigación, logramos responder a ambas preguntas: el microARN en cuestión era miR-2, y la proteína regulada, nuestra vieja conocida Kr-h1.

Varios experimentos nos llevaron a esos resultados. En primer lugar, comprobamos que, en los individuos que

XAVIER BELLÉS Y JESÚS LOZANO

no producían microARN, los niveles de ARNm de Kr-h1 no desaparecían en la última fase ninfal, aunque hubiera decaído la producción de hormona juvenil; como consecuencia, los insectos no mostraban metamorfosis. De ahí dedujimos que algún microARN contribuía a la desaparición de ARNm de Kr-h1, y seguidamente confirmamos que dicho ARNm contenía sitios de unión para el microARN denominado miR-2. Tales observaciones sugirieron que miR-2 se unía a los ARNm de Kr-h1 en la última fase ninfal, lo que impedía su traducción y propiciaba el inicio inmediato de la metamorfosis.

Un par de ensayos adicionales nos sirvieron para corroborar esa idea. Por un lado, administramos a los insectos un inhibidor de miR-2 en la última fase ninfal y, según esperamos, no experimentaron metamorfosis (ya que la expresión de Kr-h1 no disminuyó lo suficiente). Por otro lado, tras eliminar en algunos animales la expresión de todos los microARN (lo cual impedía su metamorfosis), se les administró un análogo de miR-2. Observamos que en esos individuos se restauraba la metamorfosis. En ellos, la expresión de Kr-h1, que no disminuyó con la eliminación de todos los microARN, sí lo hizo al añadir miR-2, lo que demostraba el papel clave de esta última molécula.

En conjunto, los datos indican que miR-2 bloquea los ARNm de Kr-h1 en la última fase ninfal, un hecho que resulta esencial para que el insecto ejecute con éxito la metamorfosis y adquiera la forma adulta. Se trata de un elegante mecanismo en el contexto de un proceso biológico complejo, protagonizado por un simple microARN.

Aunque nuestro conocimiento de cómo actúan las hormonas reguladoras de la metamorfosis ha mejorado mucho en los últimos años, numerosas preguntas siguen sin respuesta. Algunas de las más inmediatas, y en las que está trabajando nuestro grupo, son las siguientes: si la metamorfosis empieza en el embrión ¿qué papel desempeña el eje MEKRE93 en ese período del desarrollo? ¿Qué factores determinan la expresión de E93, aparte de la disminución de los niveles de Kr-h1? ¿Cuáles son los genes regulados por E93? La investigación en este campo es muy dinámica, lo cual sugiere que esas preguntas serán contestadas pronto, al tiempo que aparecerán otras nuevas, como no puede ser de otro modo en toda investigación científica.

—Xavier Bellés
Instituto de Biología Evolutiva
CSIC-Universidad Pompeu Fabra
Barcelona

PARA SABER MÁS

The MEKRE93 (Methoprene tolerant-Krüppel homolog 1-E93) pathway in the regulation of insect metamorphosis, and the homology of the pupal stage. X. Bellés y C. G. Santos en *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 52, págs. 60-68, 2014.

Transcription factor E93 specifies adult metamorphosis in hemimetabolous and holometabolous insects. E. Ureña, et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 111, págs. 7024-7029, 2014.

MiR-2 family regulates insect metamorphosis by controlling the juvenile hormone signaling pathway. J. Lozano, R. Montañez y X. Bellés en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 112, págs. 3740-3745, 2015.



EVOLUCIÓN

LA ESPECIE MÁS INVASORA

Numerosas especies humanas han habitado la Tierra, pero solo la nuestra ha colonizado el planeta entero. ¿Cómo lo ha logrado?

Curtis W. Marean

JON FOSTER

Curtis W. Marean es profesor en la facultad de evolución humana y cambio social de la Universidad estatal de Arizona y director asociado del Instituto de los Orígenes Humanos, en la misma universidad. También es profesor honorario de la Universidad Metropolitana Nelson Mandela, en Sudáfrica. Se interesa en especial por los orígenes de los humanos modernos y la ocupación de los ecosistemas litorales. Su investigación es financiada por la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. y la Fundación de la Familia Hyde.





ACE MENOS DE 70.000 AÑOS QUE NUESTRA ESPECIE, *HOMO SAPIENS*, SALIÓ DE ÁFRICA y empezó a propagarse por todo el planeta. En Europa y Asia ya se habían establecido otras especies humanas, pero solo nuestros antepasados lograron colonizar todos los continentes y alcanzar islas remotas. La dispersión se realizó de un modo inusual. En todos los lugares donde llegó *H. sapiens* se produjeron grandes cambios ecológicos. Todas las especies arcaicas con las que se encontró acabaron extinguiéndose, como también numerosas especies de animales. Sin duda, ha sido la migración que más consecuencias ha tenido en la historia de la Tierra.

Los paleoantropólogos han debatido durante tiempo sobre cómo y por qué solo los humanos modernos lograron esa asombrosa hazaña de dispersión y dominio. Algunos expertos sostienen que la evolución de un cerebro voluminoso y más avanzado permitió a nuestros antepasados alcanzar nuevos territorios y enfrentarse a los desafíos con los que se encontraron. Otros afirman que una técnica novedosa, con la que los primeros humanos modernos abatieron presas o se enfrentaron a sus enemigos con una eficacia muy superior, propició la expansión de nuestra especie fuera de África. Un tercer escenario señala que un cambio climático habría debilitado las poblaciones de neandertales y de otras especies humanas arcaicas que habían ocupado los territorios fuera de África, lo que dio a *H. sapiens* cierta ventaja y le permitió colonizar parte del territorio. Sin embargo, ninguna de estas hipótesis ofrece una teoría general que explique por completo los logros de nuestra especie. De hecho, la mayoría de ellas han sido planteadas para explicar el registro arqueológico de *H. sapiens* de regiones concretas, como Europa occidental. Este punto de vista fragmentario sobre nuestra expansión ha confundido a los científicos. La gran diáspora humana consistió en un solo evento con diferentes fases y, por tanto, necesita ser investigado como un problema único.

Las excavaciones que mi equipo ha realizado durante los últimos dieciséis años en los yacimientos de Pinnacle Point, en la costa sur de Sudáfrica, junto con ciertos avances teóricos en las ciencias biológicas y sociales, nos han llevado a proponer otra idea sobre la forma en que conquistamos el mundo. Creemos que la diáspora se produjo cuando en nuestra especie apareció un nuevo comportamiento social, codificado en los genes: una tendencia a cooperar con individuos no emparentados. La incorporación de este tipo de conducta a la cognición avanzada de nuestros antepasados permitió una rápida adaptación a nuevos ambientes. También fomentó la innovación que dio lugar a la creación de una nueva técnica de caza: las armas de proyectil. Equipados de esta forma, esos humanos se establecieron fuera de África, preparados para someter a todo el mundo a su voluntad.

DESEO DE EXPANDIRSE

Para apreciar lo extraordinario de la colonización del planeta por *H. sapiens* debemos remontarnos hasta el origen evolutivo de nuestra especie en África, hace 200.000 años. Durante decenas de miles de años, los primeros humanos anatómicamente modernos, que eran iguales a nosotros, estuvieron confinados dentro de los límites de su continente madre. Hace unos 100.000 años, un grupo de ellos hizo una breve incursión en el Próximo Oriente, pero al parecer no logró ir más allá. Estos humanos necesitaban una ventaja que todavía no tenían. Algo después, hace 70.000 años, una pequeña población fundadora abandonó África una vez más y comenzó la exitosa dispersión hacia nuevos territorios. A medida que se expandieron por Eurasia, se encontraron con otras especies humanas estrechamente emparentadas con ellos: los neandertales en Europa occidental y miembros del recientemente descubierto linaje denisovano en Asia. Aunque parte del ADN de ambos persiste en las personas de hoy en día

EN SÍNTESIS

De todas las especies humanas que han vivido sobre nuestro planeta, solo *Homo sapiens* ha logrado colonizarlo en su totalidad.

Los científicos se han preguntado durante mucho tiempo por qué nuestra especie es la única que ha conseguido dispersarse de tal modo.

Una nueva hipótesis sostiene que la combinación de dos innovaciones únicas ha permitido a *H. sapiens* dominar todo el planeta: la tendencia codificada en los genes para cooperar con desconocidos y las armas de proyectil avanzadas.

como resultado del cruzamiento ocasional entre los distintos grupos, poco después de que llegasen los humanos modernos las especies arcaicas se extinguieron.

Cuando llegaron a las costas del sudeste de Asia se enfrentaron a un mar aparentemente infinito, sin tierra a la vista. Sin embargo, siguieron adelante, impertérritos. Al igual que nosotros, esas personas pudieron imaginar y desear nuevas tierras para explorar y colonizar, por lo que construyeron embarcaciones capaces de atravesar océanos y, adentrándose en el mar, llegaron a las costas de Australia hace al menos 45.000 años. *H. sapiens* fue la primera especie humana que alcanzó esta parte del mundo; tras llegar, dotada de propulsores y de fuego, ocupó con rapidez todo el continente. Muchas de las especies extrañas de marsupiales que habían gobernado durante mucho tiempo esta región apartada se extinguieron. Hace unos 40.000 años, estos pioneros descubrieron y cruzaron un puente de tierra hacia Tasmania, pero las impenetrables aguas de los océanos australes les impidieron el paso a la Antártida.

Al norte del ecuador, otra población de *H. sapiens* que se desplazaba hacia el noreste penetró en Siberia y se dispersó en todas las regiones que rodean el polo norte. Durante algún tiempo los glaciares y las tierras heladas les impidieron alcanzar América. Aunque los expertos debaten sobre la fecha exacta en que llegaron al Nuevo Mundo, sí hay acuerdo en que al menos hace 14.000 años lograron superar estas barreras y se dispersaron por un continente donde los animales nunca se habían enfrentado a los cazadores humanos. En tan solo unos pocos miles de años llegaron a la punta más austral de América del Sur y, a su paso, causaron la extinción masiva de grandes especies de la Edad de Hielo, como los mastodontes y los perezosos gigantes.

Madagascar y muchas islas del Pacífico quedaron al margen de la dispersión humana durante más de 10.000 años, pero finalmente los navegantes descubrieron y colonizaron casi todos estos lugares. Igual que otras regiones, estas islas sufrieron las duras consecuencias de la ocupación: ecosistemas quemados, exterminación de especies y remodelación de ambientes según la voluntad de nuestros predecesores. La colonización humana de la Antártida llegó, por último, en la era industrial.

TRABAJAR EN EQUIPO

Pero ¿cómo lograron nuestros antepasados, tras estar confinados durante decenas de miles de años en África, superar las barreras y ocupar no solo las regiones que otras especies humanas habían colonizado, sino el mundo entero? Una teoría válida para explicar esta diáspora debe cumplir dos condiciones: en primer lugar, debe aclarar por qué el proceso se inició cuando lo hizo y no antes; en segundo lugar, debe proponer un mecanismo que permitiese la dispersión rápida a través de la tierra y el mar, lo que habría exigido tener la capacidad de adaptarse a nuevos entornos y desplazar a otras especies humanas arcaicas. Proponemos que la mejor explicación de esa rápida expansión la ofrece la aparición de rasgos que nos hacen, por un lado, colaboradores sin igual y, por otro, competidores despiadados. Mientras que los humanos modernos contaban con ese rasgo, los neandertales y otros parientes extintos no. Creemos que fue la última adquisición importante del conjunto de características que contribuyen a lo que el antropólogo Kim Hill, de la Universidad estatal de Arizona, ha llamado «singularidad humana».

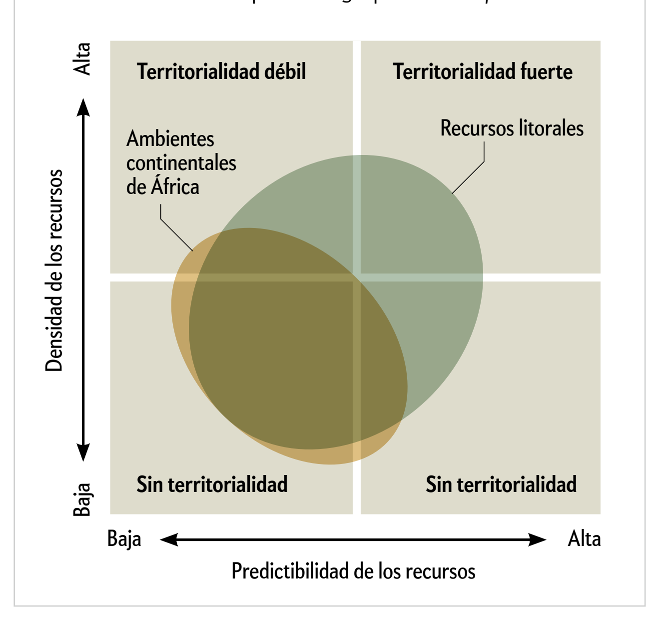
Los humanos modernos cooperamos en un grado extraordinario. Nos involucramos en actividades de grupo y mostramos una coordinación muy compleja con personas que no son parientes nuestros o incluso con extraños. Intentemos imaginar la siguiente escena propuesta por la antropóloga Sarah Blaffer Hrdy, de la Universidad de California en Davis, en su libro de 2009 *Mothers and others*: unos doscientos chimpancés haciendo cola, subiendo a un avión, permaneciendo sentados durante horas para finalmente salir de este como autómatas. Resulta impensable porque lucharían entre sí sin parar. Pero nuestra naturaleza cooperativa nos permite hacerlo. La misma especie que salta en defensa de un extraño perseguido también forma asociaciones con desconocidos para mantener una guerra contra otro grupo y no muestra ninguna misericordia hacia sus competidores. Muchos de nuestros colegas y nosotros creemos que esta tendencia a colaborar (que he denominado hiperprosociabilidad) no es un comportamiento aprendido, sino un rasgo codificado genéticamente solo en *H. sapiens*. Hay otros animales que muestran indicios de colaboración, pero la que exhiben los humanos modernos es muy diferente.

La cuestión de cómo adquirimos la predisposición genética a un grado de cooperación tan extraordinario resulta difícil de resolver. Pero los modelos matemáticos de evolución social han ofrecido algunas pistas valiosas. El economista Sam Bowles, del Instituto de Santa Fe, ha demostrado que una condición óptima bajo la cual la hiperprosociabilidad genética puede propagarse se da, paradójicamente, cuando hay conflicto entre grupos. Los que presentan un mayor número de personas prosociales funcionarán con mayor eficacia y, por lo tanto, vencerán a otros y

TEORÍA

Cuándo vale la pena luchar

Una teoría clásica de la biología sostiene que la selección natural favorece la defensa agresiva de las fuentes de alimentos (la territorialidad) cuando el beneficio de acceder a estos recursos de modo exclusivo supera el coste de vigilarlos. Entre los humanos que viven en pequeñas sociedades, la territorialidad resulta ventajosa cuando los alimentos están concentrados y son predecibles. En África, algunas zonas litorales disponen de alimento abundante y predecible en forma de bancos de marisco. Estos ambientes probablemente desencadenaron la territorialidad en los primeros grupos de *H. sapiens*.



FUENTE: CURTIS W. MAREAN, SEGÚN «HUMAN TERRITORIALITY: AN ECOLOGICAL REASSESSMENT», POR RADA DYSON-HUDSON Y ERIC ALDEN SMITH EN *AMERICAN ANTHROPOLOGIST*, VOL. 80, N.° 1, MARZO DE 1978; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

transmitirán los genes de este comportamiento a la siguiente generación, con lo que la hiperprosociabilidad se extenderá. Además, los trabajos del biólogo Pete Richerson, de la Universidad de California en Davis, y del antropólogo Rob Boyd, de la Universidad estatal de Arizona, revelan que este comportamiento se propaga mejor cuando se origina en una subpoblación y la competencia entre los grupos es intensa, y también cuando el tamaño de la población es reducido, como la población africana de *H. sapiens* de la que todos descendemos.

Los cazadores-recolectores suelen vivir en grupos de unos 25 individuos, los cuales se casan con otros de fuera del grupo y forman tribus de varios grupos vinculados por el intercambio de parejas y bienes y por un lenguaje y tradiciones comunes. En ocasiones también se pelean con otras tribus. Sin embargo, al hacerlo corren grandes riesgos, lo que plantea la cuestión de qué puede desencadenar esta disposición a entrar en combate.

La interpretación sobre cuándo compensa entablar una lucha se apoya sobre la teoría clásica de la «defendibilidad económica», propuesta en 1964 por Jerram Brown, ahora en la Universidad de Albany, para explicar la variación de la agresividad entre las aves. Brown planteaba que los individuos actúan de forma violenta para alcanzar ciertas metas que aumentan su supervivencia y su éxito reproductor. La selección natural favorece la lucha cuando esta permite alcanzar tales objetivos. Una meta principal en todos los organismos consiste en asegurarse el suministro de alimentos. Si la comida puede defenderse, entonces se seleccionará la aparición de un comportamiento agresivo que permita protegerla. Pero si los recursos no pueden defenderse o cuesta demasiado vigilarlos, entonces tal conducta resultará contraproducente.

En otro artículo clásico publicado en 1978, Rada Dyson-Hudson y Eric Alden Smith, ambos entonces en la Universidad Cornell, aplicaron la teoría de la defendibilidad económica a sociedades humanas pequeñas. Su trabajo mostró que la defensa de los recursos tiene sentido cuando estos se hallan concentrados y son predecibles. Nosotros añadiríamos que los recursos en cuestión deben ser cruciales para el organismo, ya que nadie va a proteger un recurso que no necesita. Este principio todavía se mantiene hoy en día: los grupos étnicos y los Estados luchan ferozmente por obtener recursos abundantes, previsibles y valiosos, como el petróleo, el agua y la tierra fértil. Una implicación de esta teoría sobre la territorialidad es que, cuando apareció *H. sapiens*, los ecosistemas que habrían fomentado el conflicto intergrupal y, a su vez, los comportamientos cooperativos que permitirían tales combates no se hallaban generalizados en todo el mundo. Se limitaban a aquellos lugares donde abundaban recursos de alta calidad. En África, estos suelen resultar escasos e impredecibles, lo cual explica por qué la mayoría de los pueblos cazadores-recolectores estudiados en ese continente invierten poco tiempo y energía en la defensa de las fronteras. Pero hay excepciones a esta regla. Algunas regiones costeras concentran alimentos muy ricos en forma de amplios lechos de marisco. Y los registros etnográficos y arqueológicos de los pueblos cazadores-recolectores revelan que los mayores conflictos se han producido entre los grupos que aprovechaban los recursos litorales, como los indios de la costa del Pacífico en Norteamérica.

¿En qué momento los alimentos abundantes y previsibles se convirtieron en la piedra angular de la dieta humana? Durante millones de años, nuestros antepasados se nutrían de plantas y animales terrestres, y, en ocasiones, de alimentos acuáticos continentales. Todos estos recursos se hallan poco concentrados en el espacio y la mayoría resultan impredecibles. Por esta razón, nuestros antecesores vivían en grupos muy dispersos y estaban constantemente viajando en busca de sustento. Al aumentar la capacidad cognitiva humana, alguna población ideó la forma de sobrevivir en la costa a base del consumo de marisco. Las excavaciones de mi equipo en los yacimientos de Pinnacle Point indican que este cambio comenzó en las costas del sur de África hace 160.000 años. Allí, por primera vez en la historia de la humanidad, se empezaron a consumir recursos que aparecían en grandes cantidades y que eran predecibles y muy nutritivos, un hecho que provocó un importante cambio social.

El registro genético y arqueológico indica que *H. sapiens* sufrió una disminución en su población poco después de su origen, debido a una fase de enfriamiento global que duró desde hace unos 195.000 hasta hace 125.000 años. Durante los ciclos glaciales más intensos, cuando era difícil hallar plantas comestibles y animales en los ecosistemas continentales, los ambientes litorales constituyeron un refugio donde obtener alimentos. Los recursos de esas zonas resultaron cruciales para la supervivencia de nuestra especie y también se convirtieron en un motivo de lucha. Experimentos recientes realizados en la costa del sur de África por Jan De Vynck, de la Universidad Metropolitana Nelson Mandela, muestran que los bancos de mariscos pueden ser muy productivos y proporcionar hasta 4500 calorías por hora dedicada a la recolección. Nuestra hipótesis plantea, en esencia, que los recursos litorales eran abundantes, predecibles y muy nutritivos. Tales condiciones generaron un alto nivel de territorialidad entre los humanos, la cual desencadenó conflictos intergrupales. La lucha constante propició la selección de las conductas prosociales dentro de los grupos. Trabajar de forma cooperativa permitía defender los bancos de mariscos y mantener el acceso exclusivo a este preciado bocado, por lo que este comportamiento se extendió por toda la población.

ARMAS DE GUERRA

Con tal capacidad de cooperar con individuos no emparentados, *H. sapiens* se hallaba preparado para convertirse en una fuerza imparable. Sin embargo, pensamos que también necesitaría una nueva técnica para alcanzar su máximo potencial de conquista: las armas de proyectil. Esta invención tardó tiempo en adquirirse. Las técnicas son aditivas, ya que se basan en experimentos y conocimientos previos que se vuelven cada vez más complejos. El desarrollo de las armas de proyectil habría seguido ese camino. Lo más probable es que evolucionase desde los palos de apuñalamiento, las lanzas, los propulsores para lanzar venablos (*atlatl*), el arco y las flechas hasta alcanzar las formas tan refinadas que hoy utilizamos para lanzar objetos mortíferos.

A cada paso, esa técnica se hizo más letal. Una lanza de madera simple afilada en un extremo puede producir heridas punzantes, pero estas lesiones tienen un impacto limitado debido a que el animal no sangra de forma rápida. El daño aumenta si se incorpora una punta de piedra tallada. No obstante, para fabricarla se requieren distintas técnicas sucesivas: debe darse forma de punta a un utensilio lítico para que penetre en la piel de los animales, con una base que permita unirla a una lanza; y debe engancharse firmemente la punta de piedra a la madera, ya sea mediante algún pegamento o algún material para atar. Jayne Wilkins, ahora en la Universidad de Ciudad del Cabo, y sus colaboradores han demostrado que las herramientas de piedra halladas en el yacimiento sudafricano Kathu Pan 1 se utilizaron como puntas de lanza hace unos 500.000 años.

La antigüedad de Kathu Pan 1 indica que este tipo de técnica fue desarrollado por el último antepasado común de los neandertales y de los humanos modernos. Como era de esperar, los restos posteriores, de hace 200.000 años, demuestran que ambas especies descendientes también la utilizaban. Tal coincidencia significa que durante cierto tiempo hubo un equilibrio de poder entre los neandertales y los primeros *H. sapiens*. Pero esa situación cambiaría pronto.

Los expertos coinciden en que la aparición de utensilios de piedra diminutos en el registro arqueológico señala el desarrollo de una verdadera técnica de proyectil, en la que la ligereza y la balística resultan fundamentales. Las herramientas son demasiado pequeñas para poder ser empleadas directamente con la mano. Es necesario montarlas o engancharlas mediante ranuras a un hueso o madera para crear armas que puedan ser lanzadas a gran velocidad y larga distancia. Los ejemplos más antiguos que se conocen de la denominada industria de microlitos proceden precisamente de Pinnacle Point. En un refugio rocoso, conocido como PP5-6, mi equipo descubrió una larga secuencia de ocupación humana. Mediante el método de datación llamado luminiscencia por estimulación óptica, la geocronóloga Zenobia Jacobs, de la Universidad de Wollongong, determinó que los niveles arqueológicos de PP5-6 abarcaban un período de hace entre 90.000 y 50.000 años. Las herramientas microlíticas más antiguas del yacimiento datan de unos 71.000 años [*véase* «El origen de la cultura humana», por Zenobia Jacobs y Richard G. Roberts; Investigación y Ciencia, noviembre de 2009].

Esta datación sugiere que un cambio climático pudo haber precipitado la invención de la nueva técnica. Antes de hace 71.000 años, los habitantes de PP5-6 elaboraban grandes puntas de piedra y cuchillos utilizando cuarcita, un tipo de roca. Un miembro de mi equipo, Erich Fisher, de la Universidad estatal de Arizona, ha demostrado que en aquella época la costa se situaba cerca de Pinnacle Point. Y las reconstrucciones del clima y del ambiente realizadas por Mira Bar-Matthews, del Servicio Geológico de Israel, y Kerstin Braun, ahora investigadora posdoctoral en la Universidad estatal de Arizona, indican que las circunstancias se asemejaban a las que prevalecen hoy en día en la zona, con fuertes lluvias en invierno y una vegetación arbustiva. Pero, hace unos 74.000 años, el clima del mundo comenzó a cambiar hacia unas condiciones glaciales. El nivel del mar descendió y quedó expuesta una amplia llanura litoral. Y las lluvias de verano aumentaron, lo que propició la extensión de pastos de alto valor nutritivo y bosques dominados por acacias. Creemos que en estas llanuras emergidas se desarrollaría un ecosistema donde los animales migrarían en busca de alimento; siguiendo las precipitaciones y la hierba fresca, se desplazarían hacia el este en verano y hacia el oeste en invierno [*véase* «Cambios climáticos y evolución humana», por Peter B. deMenocal; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014].

No está claro por qué los habitantes de PP5-6 empezaron a fabricar utensilios de piedra pequeños y ligeros poco después de que el clima cambiase. Quizás intentaban cazar los animales que migraban a través de la nueva llanura. Cualquiera que sea la razón, lograron crear técnicas ingeniosas para construir sus herramientas diminutas. Empezaron a utilizar otro tipo de piedra como materia prima, la silcreta, que calentaban con fuego para ayudar a dar forma a las pequeñas y afiladas puntas. Solo tras el cambio climático, gracias a la extensión de los bosques de acacia, los primeros humanos modernos tuvieron acceso a un suministro constante de leña con el que pudieron fabricar con calor estas herramientas microlíticas.





CORTESÍA DE SIMEN OESTMO (*arriba*); CORTESÍA DE BENJAMIN SCHOVILLE (*abajo*)

LOS DIMINUTOS CUCHILLOS DE PIEDRA, o microlitos (*arriba*), hallados en Pinnacle Point, Sudáfrica, indican que los humanos inventaron las armas de proyectil hace al menos 71.000 años. Unían los microlitos a varas de madera para formar flechas o dardos, como se observa en esta reconstrucción (*abajo*).

Todavía desconocemos en qué tipo de técnica de proyectil se empleaban esos microlitos. Mi colega Marlize Lombard, de la Universidad de Johannesburgo, ha estudiado ejemplos ligeramente posteriores de otros yacimientos y piensa que representan el origen del arco y la flecha, ya que los patrones de daño presentes en ellos se asemejan a los observados en puntas de flecha. Pero no estamos totalmente convencidos de esta idea, dado que su estudio no analizó el daño que pueden generar los propulsores de venablos. Ya sea en Pinnacle Point o en otra parte, creemos que la técnica de los propulsores es más simple y precedió a la más compleja del arco y las flechas.

También sospechamos que, al igual que los últimos cazadores-recolectores de África, cuyas vidas han sido documentadas en estudios etnográficos, los primeros *H. sapiens* habrían descubierto la eficacia del veneno y lo utilizaron para aumentar el poder letal de los proyectiles. En la caza con lanza, el último instante antes de la muerte de la presa resulta caótico y peligroso. Un animal en el suelo, caído de rodillas por agotamiento y por la

pérdida de sangre, acude a un último recurso: el instinto lo lleva a luchar por su vida por última vez e intenta huir y clavar sus cuernos en las entrañas del agresor. Las vidas tan cortas y los cuerpos magullados de los neandertales hacen pensar que sufrieron las consecuencias de la caza de animales grandes con lanzas de corto alcance. Ahora podemos imaginar las ventajas de un proyectil lanzado a larga distancia y con la punta impregnada de veneno que paralizara la presa, lo que permitiría al cazador poner fin a la persecución con poco riesgo. La nueva arma se convirtiría en un invento revolucionario.

FUERZA DE LA NATURALEZA

La combinación de las armas de proyectil y un comportamiento hiperprosocial dio lugar a un ser nuevo muy especial, cuyos representantes formaban equipos que operaban como si se tratara de un depredador único e imparable. Ninguna presa o enemigo se hallaba a salvo. Gracias a esta poderosa combinación, un grupo de seis hombres que hablen seis idiomas distintos pueden ponerse a remar al unísono y remontar olas de diez metros para que un arponero pueda elevarse por la proa y, a la orden del capitán, lanzar un hierro letal contra el cuerpo palpitante de un

NUEVO ESCENARIO

El último invasor

Homo sapiens no se limitó a seguir las huellas de sus predecesores. Se adentró en territorios novedosos y transformó los ecosistemas a donde logró llegar.

Después del origen del género *Homo* en África (*morado*), hace unos dos millones de años, distintas especies primitivas de humanos empezaron a dispersarse fuera del continente. Llegaron a ocupar diversas regiones de Eurasia y, finalmente, evolucionaron hacia el *Homo erectus*, los neandertales y los denisovanos (*verde*).

Hace 200.000 años apareció el *H. sapiens* anatómicamente moderno. Cuando las condiciones climáticas empeoraron e hicieron inhabitable gran parte del interior de África, hace unos 160.000 años, algunos miembros de nuestra especie se refugiaron en la costa sur y aprendieron a alimentarse de los ricos bancos de marisco. El autor propone que este cambio en el estilo de vida les llevó a desarrollar una tendencia codificada en los genes a cooperar con individuos no emparentados, lo que les ayudó a defender mejor el marisco frente a los intrusos. Gracias a la singular colaboración y conectividad social, nuestros antepasados se hicieron cada vez más creativos e inventaron así una técnica revolucionaria: las armas de proyectil.

Dotado con estos dos atributos, la cooperación extrema y las armas de proyectil, *H. sapiens* se hallaba preparado para salir de África y conquistar el mundo (*flechas rojas*). Se extendió más allá de Europa y Asia, y llegó a continentes e islas donde nunca antes lo había logrado ningún humano (*marrón*).

Secuelas

Con la propagación de nuestra especie se sucedieron grandes cambios ecológicos. La colonización de Europa y Asia terminó con los humanos arcaicos que allí vivían. Cuando *H. sapiens* alcanzó regiones nunca antes habitadas por ninguna otra especie humana, cazó con rapidez las grandes presas, o megafauna, hasta provocar su extinción. Probablemente, la megafauna de Eurasia soportó mejor la invasión, ya que durante mucho tiempo había convivido con la presencia de humanos arcaicos y se había producido un equilibrio entre depredadores y presas.

FUENTE: «GLOBAL LATE QUATERNARY MEGAFAUNA EXTINCTIONS LINKED TO HUMANS, NOT CLIMATE CHANGE», POR CHRISTOPHER SANDOM ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 281, 22 DE JULIO DE 2014 (*dispersión de los homininos y mapa de extinción de la megafauna*); TERRA CARTA (*mapas*)

leviatán, un animal que vería a los humanos como a pequeños pececillos. De la misma forma, una tribu de 500 personas dispersas en una red de 20 bandas puede desplegar un pequeño ejército para exigir retribución a una tribu vecina por haber penetrado en su territorio.

La aparición de esa extraña mezcla de carácter asesino y a la vez colaborador permitiría explicar por qué, cuando reaparecieron las condiciones glaciales hace entre 74.000 y 60.000 años y amplias regiones de África se volvieron inhóspitas, las poblaciones humanas modernas no disminuyeron como lo habían hecho antes. De hecho, en Sudáfrica se expandieron y crearon una amplia diversidad de herramientas complejas. La diferencia radicaba esta vez en que los humanos estaban equipados para responder a cualquier crisis ambiental gracias a sus conexiones sociales flexibles y a las nuevas técnicas. Se convirtieron en los depredadores alfa del medio terrestre y, con el tiempo, del marino. Esta capacidad para dominar cualquier ambiente fue la clave que finalmente les abrió la puerta de África y del resto del mundo.

Las especies humanas arcaicas, que no podían aliarse ni lanzar armas, no tenían ninguna posibilidad de enfrentarse a esa nueva especie. Se ha debatido durante tiempo por qué se extinguieron nuestros primos neandertales. Creo que la explicación más escalofriante, pero también la más probable, es que los los humanos invasores vieron los neandertales como un competidor y una amenaza y, por consiguiente, los exterminaron. Habían evolucionado para actuar de este modo.

A veces pienso en cómo se produjo ese fatídico encuentro entre ambas especies. Me imagino a los neandertales alrededor de sus fogatas jactándose con relatos de batallas titánicas contra enormes osos y mamuts, unas luchas emprendidas bajo el cielo gris de la Europa glacial que dejaban en el hielo manchas de la sangre de sus presas y de sus hermanos. Pero un día, las historias sufrirían un giro brusco y los príncipes se volvieron temerosos. Los narradores hablaban de nuevas personas que llegaban a sus tierras, gente rápida e inteligente que lanzaban sus lanzas desde distancias imposibles, con una precisión espantosa. Estos extraños se presentaban incluso de noche en grupos grandes, matando a hombres y niños y capturando a algunas mujeres.

La triste historia de los neandertales, las primeras víctimas del ingenio y la cooperación de los humanos modernos, ayuda a entender por qué hoy en día se suceden en todo el mundo horribles actos de genocidio y exterminio. Cuando los recursos y las tierras escasean, designamos a los que no se nos parecen o no hablan igual que nosotros como «los otros», y luego, para eliminar la competencia, usamos esas diferencias para justificar su matanza o expulsión. La ciencia ha descubierto los estímulos que nos empujan a clasificar a las personas como «otros» y a tratarlas de forma execrable. Pero el hecho de que *H. sapiens* evolucionara para reaccionar de esta manera despiadada en situaciones de penuria no significa que no podamos evitarlo. La cultura puede anular incluso el más fuerte de los instintos biológicos. Espero que el reconocimiento de las causas de esa transformación instintiva en tiempo de vacas flacas nos permita elevarnos por encima de nuestros impulsos malévolos y prestar atención a uno de nuestros principios culturales más importantes: «Nunca más».

Hace unos 14.000 años
Llegada a Norteamérica
Extinción de la megafauna

Hace unos 13.500 años
Llegada a Sudamérica
Extinción de la megafauna

Origen del género *Homo*
Primeras especies arcaicas de *Homo*, incluido *H. erectus*
Últimas especies arcaicas de *Homo*, incluidos los neandertales y los denisovanos
Especies arcaicas de *Homo* periféricas
H. sapiens
Dispersión de *H. sapiens*
Los humanos modernos no son los primeros en llegar; extinción de otros homininos
Los humanos modernos son los primeros en llegar; extinción de megafauna

Tasa de extinción de grandes mamíferos 0 % 78 % Sin datos

PARA SABER MÁS

An early and enduring advanced technology originating 71,000 years ago in South Africa. Kyle S. Brown et al. en *Nature*, vol. 491, págs. 590-593, noviembre de 2012.

The origins and significance of coastal resource use in Africa and western Eurasia. Curtis W. Marean en *Journal of Human Evolution*, vol. 77, págs. 17-40, diciembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cuando el mar salvó a la humanidad. Curtis W. Marean en *IyC*, octubre de 2010.
Raíces del espíritu cooperativo. Frans B. M. De Waal en *IyC*, noviembre de 2014.
La pequeña gran diferencia. Gary Stix en *IyC*, noviembre de 2014.



EL GRAN ESPEJO: Instalado en el telescopio Gemini Sur, en los Andes chilenos, el instrumento GPI ha sido diseñado para tomar imágenes directas de exoplanetas gigantes gaseosos.



EXOPLANETAS

A LA CAZA DE GIGANTES GASEOSOS

Dos grupos de investigación intentarán descubrir exoplanetas gigantes mediante una nueva técnica: la toma directa de imágenes. Sus hallazgos podrían cambiar el futuro de la búsqueda de exoplanetas

Lee Billings



Lee Billings es editor de *Scientific American* y autor de *Five billion years of solitude: The search for life among the stars* (Current/Penguin Group, 2013).



En lo alto de los remotos Andes del centro de Chile, el firmamento brilla tanto que cuesta distinguir las constelaciones, engullidas por enjambres de estrellas más tenues. A pesar de la bella panorámica, tan familiar como extraña, hay algo que preocupa a Bruce Macintosh en esta noche de mayo de 2014. Incluso aquí, a 2700 metros sobre el nivel del mar, debe conformarse con observar el cielo a través de un océano de aire; el viento arrecia y las estrellas titilan demasiado para sus fines.

Macintosh ha venido a este lugar para descubrir exoplanetas gigantes gaseosos similares a Júpiter, que algunos científicos consideran necesarios para la formación de planetas rocosos y habitables semejantes a la Tierra. Sin embargo, no está interesado en buscarlos como hacen la mayoría de los investigadores, observando durante meses o incluso años estrellas distantes hasta que los sutiles cambios en su brillo o movimiento revelan gradualmente la presencia de un mundo invisible. Macintosh, astrónomo de Stanford, busca una recompensa inmediata: trata de captar verdaderas imágenes de planetas lejanos, verlos como un punto de luz y ser capaz de observar los remolinos gaseosos de su superficie a través de años luz de distancia.

Hay algo más que inquieta al experto. A 600 kilómetros al norte, en otra árida cumbre chilena, Jean-Luc Beuzit intenta hacer exactamente lo mismo. Beuzit, astrónomo del Instituto de Planetología y Astrofísica de Grenoble, es amigo de Macintosh y también su rival. El destino y la financiación han querido que ambos coincidan en las montañas chilenas para rastrear el cielo en busca de otros planetas, a fin de averiguar si el nuestro es algo tan común como la suciedad o una rareza cósmica.

La herramienta escogida por Macintosh para esta carrera astronómica es un equipo de óptica y sensores del tamaño de un automóvil y varios millones de dólares llamado Generador de Imágenes de Planetas Gemini (GPI, por sus siglas en inglés). Se encuentra instalado en el inmenso espejo de ocho metros del telescopio Gemini Sur, un disco de vidrio plateado que ocuparía la octava parte de un campo de baloncesto. Beuzit emplea un conjunto de artilugios aún mayor, del tamaño de una furgoneta, denominado SPHERE, acrónimo de Instrumento para la Investigación Espectropolarimétrica de Alto Contraste de Exoplanetas. SPHERE está montado en otro telescopio de ocho metros, perteneciente al conjunto VLT del Observatorio Europeo Austral. Ambos proyectos necesitaron más de una década para su desarrollo, pero comenzaron a funcionar con un intervalo de pocos meses. Desde sus remotos emplazamientos, los dos instrumentos estudian principalmente las mismas estrellas con el mismo objetivo: lograr las primeras instantáneas de gran calidad de un júpiter extrasolar.

A pesar de los más de 5000 mundos extrasolares descubiertos durante las últimas dos décadas, casi ninguno de ellos ha sido fotografiado de manera directa. Se trata de un objetivo arduo, ya que, desde la distancia, incluso los planetas de mayor tamaño se ven demasiado tenues y excesivamente próximos a su estrella anfitriona. Pero, si pudieran captarse tales imágenes, aunque

EN SÍNTESIS

Aunque los astrónomos saben de la existencia de miles de planetas extrasolares, apenas han podido fotografiar un puñado de ellos. Hoy por hoy, las técnicas de búsqueda se basan en métodos indirectos.

Captar la imagen de un planeta permite conocer mejor su composición, clima y habitabilidad. Sin embargo, la mayoría son casi imposibles de distinguir debido a la cercanía de su estrella anfitriona.

La toma de imágenes de planetas semejantes a la Tierra excede la capacidad de los telescopios actuales. Una nueva generación de instrumentos intenta fotografiar gigantes gaseosos similares a Júpiter.

Las nuevas técnicas tal vez permitan descubrir cómo se forman los gigantes gaseosos y de qué manera influyen sobre su entorno. También allanarán el camino para obtener imágenes de planetas rocosos.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DEL OBSERVATORIO GEMINI/AURA; ESTA PÁGINA: CORTESÍA DE G. HÜDEPOHL/OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL



ALTO Y SECO: SPHERE, otro generador de imágenes planetarias, busca jupíteres extrasolares desde el conjunto de telescopios VLT del Observatorio Europeo Austral, en el desierto chileno de Atacama.

solo fuera en forma de un pequeño borrón de píxeles, los astrónomos aprenderían mucho sobre la composición, el clima y las condiciones de habitabilidad de esos planetas. En su búsqueda de gigantes gaseosos, GPI y SPHERE emplean tecnología de vanguardia. El ser humano aún no ha construido un telescopio capaz de fotografiar un exoplaneta rocoso similar a la Tierra. Pero, si algún día lo logra, será casi con seguridad a partir de los instrumentos concebidos para estos dos proyectos.

En astronomía, igual que en la vida cotidiana, ver es creer. Y aunque la toma directa de imágenes se antoje terriblemente difícil, tal vez llegue a ser mucho más rápida a la hora de detectar planetas que las técnicas dominantes hoy en día. Al menos en principio, cabría la posibilidad de efectuar descubrimientos con imágenes obtenidas en pocas horas o días, en lugar de mediante complejos análisis de datos que requieren meses o años de duración. Por esa razón, en esta carrera por obtener las primeras imágenes de jupíteres extrasolares, no resulta exagerado afirmar que cada minuto cuenta.

LA LIEBRE Y LA TORTUGA

El tiempo juega contra Macintosh mientras trabaja en la sala de control de Gemini Sur en esta noche de mayo de 2014. Aún cansado por el cambio horario provocado por la sucesión de vuelos entre California y Chile, se mantiene despierto a base de Coca Cola Light y adrenalina. Mientras observa las pantallas que muestran los parámetros vitales de GPI, parece que solo su cuerpo está en la sala. Su mente se encuentra en otro lugar, en la cúpula adyacente que alberga el telescopio de ocho metros.

Antes de que GPI pueda comenzar la búsqueda de nuevos planetas, deberá superar una larga secuencia de pruebas y calibraciones. Estas comenzaron a finales de 2013 y ahora, en mayo de 2014, se encuentran cerca de su fin. Se trata de un trabajo tedioso y sin encanto; nadie ha recibido nunca un premio por asegurarse de que un instrumento funciona como debe. De momento, GPI cuenta con una ventaja de 250.000 minutos sobre SPHERE, ya que este recién ha empezado el mismo proceso de puesta a punto. Sin embargo, eso apenas consuela a Macintosh, ya que SPHERE cuenta con un conjunto más potente de instrumentos y con más tiempo de observación que GPI. Ello debería permitir a SPHERE observar un número mayor de estrellas en un campo de visión más amplio, con mayor resolución espectral y en un abanico más ancho de longitudes de onda. En otras palabras, aunque GPI va en cabeza, como la liebre de la célebre fábula de Esopo, SPHERE podría alcanzarle desde detrás, como la tortuga, y ganar la carrera.

El parpadeo de las estrellas se debe a las turbulencias atmosféricas, lo que ha retrasado al equipo de GPI. Mientras espera a que se calme el viento, Macintosh me cuenta historias de hace años, cuando Beuzit, él y otros responsables de GPI y SPHERE se reencontraban en un ambiente festivo en congresos de astronomía por todo el mundo, ajenos a sus futuros conflictos. «Nos juntábamos, bebíamos mucho y nos contábamos historias», recuerda. «Pero ahora no son ellos nuestros enemigos, sino el viento y las nubes.»

El viento amaina al cabo de media hora. «Bien, echemos un vistazo a HD 95086», ordena Macintosh a la docena aproximada de investigadores que se encuentran en la sala. Estos comienzan a teclear en sus ordenadores los comandos que controlan el telescopio en la cúpula contigua. En unos momentos, el instrumento se orienta hacia a su objetivo, una estrella enana blancoazulada situada a 300 años luz de la Tierra, en la constelación de Carina. Con una edad de unos 17 millones de años, HD 95086 es aún joven en términos astrofísicos. A su alrededor orbita un planeta gigante, unas cinco veces más masivo que Júpiter y situado a

DOS POSIBILIDADES

El nacimiento de un gigante gaseoso

Los planetas se forman a partir de los mismos discos de gas y polvo que dan lugar a las estrellas. En principio, un gigante gaseoso puede nacer de dos maneras: por agregación de fragmentos progresivamente mayores y acumulación posterior de gas («acreción del núcleo») o por el colapso directo de una gran masa de gas denso y frío («inestabilidad de disco»). En promedio, los gigantes jóvenes formados por acreción del núcleo deberían ser más fríos que los surgidos a partir de una inestabilidad de disco. Las imágenes en el infrarrojo de los instrumentos GPI y SPHERE tal vez revelen qué proceso domina la génesis de estos colosos.

INESTABILIDAD DE DISCO

Una vez que una estrella nace, comienza la cuenta atrás para la formación de gigantes gaseosos: en pocos millones de años la luz del astro barrerá el gas circundante, lo que limita el tiempo disponible para que se formen núcleos y acreten gas. Sin embargo, una gran masa de gas denso y frío puede colapsar y formar un planeta gigante en apenas unos miles de años. Este proceso, muy eficiente, atraparía una gran cantidad de calor en el interior del astro recién nacido, lo que le otorgaría un intenso brillo en el infrarrojo durante millones de años.

ACRECIÓN DEL NÚCLEO

En el mecanismo de acreción del núcleo, las partículas de polvo y hielo chocan y se agrupan en granos, guijarros, rocas y fragmentos cada vez mayores, hasta que finalmente forman el núcleo del planeta gigante. Después, este comenzará a acretar gas: un proceso que libera grandes cantidades de energía debido a las ondas de choque generadas a medida que el gas se apila sobre el astro. A causa de esa radiación temprana de calor, el planeta gigante recién formado será más frío y menos luminoso que uno nacido por inestabilidad de disco.

RON MILLER

una distancia que dobla la que media entre el Sol y Plutón. Este planeta ya ha sido fotografiado con anterioridad por proyectos de toma directa de imágenes con menor capacidad técnica que GPI. Los investigadores calibrarán ahora el instrumento comparando las nuevas fotografías con los resultados previos.

Como todos los mundos que busca GPI, este planeta apenas se ha enfriado desde su formación, por lo que brilla con intensidad en el infrarrojo. La mayoría de los planetas son millones o miles de millones de veces menos brillantes que sus estrellas anfitrionas, como una mota de polvo situada junto a una bola de fuego termonuclear. Los jupíteres jóvenes, sin embargo, son diferentes: se parecen más a una brasa al rojo vivo que se enfría cerca de una hoguera. Justo por esa razón, GPI y SPHERE tienen alguna esperanza de detectarlos y aprender cómo se formaron y evolucionaron.

EL MISTERIOSO ORIGEN DE JÚPITER

Un embarazoso secreto a voces entre los expertos es que nadie sabe realmente cómo se originó el mayor de los cuerpos que orbita alrededor del Sol. Los astrónomos están ansiosos por averiguarlo, ya que, al dar forma a todo lo que les rodea, los gigantes gaseosos pueden considerarse los artífices de los sistemas planetarios.

La mayoría de los planetas gigantes conocidos no se parecen en absoluto a Júpiter. Buena parte de ellos se encuentran a una cercanía abrasadora de su estrella anfitriona, con órbitas que duran apenas media semana. La teoría más aceptada sobre estos mundos sostiene que se gestaron a distancias mucho mayores y que luego cayeron en espiral hacia sus respectivos soles por efecto de la interacción gravitatoria con otros planetas o con flujos de gas. Esa migración augura muy malas noticias para la habitabilidad de un sistema planetario: lo más fácil es que, en su trayecto, el campo gravitatorio de un planeta como Júpiter expulse hacia el espacio exterior cualquier planeta rocoso que se encuentre, o que lo lance contra la estrella. Además, tales gigantes gaseosos se encuentran demasiado próximos a su estrella para fotografiarlos directamente con las técnicas de observación actuales.

Al igual que sus primos exoplanetarios mucho más calientes, parece probable que Júpiter también efectuase una migración en el pasado. Pero, por algún motivo desconocido, esta fue solo temporal y no arrastró al coloso hasta las inmediaciones del Sol. Puede que Júpiter no pasase de la órbita de Marte y que luego se retirase al sistema solar exterior, donde ha permanecido desde entonces. Y aunque los vaivenes de un planeta gigante pueden dar al traste con la habitabilidad de un sistema planetario, Júpiter parece haber ejercido justo el efecto contrario. Como poco, se cree que los periplos del gigante gaseoso lanzaron cometas con abundante agua hacia nuestro planeta, lo que favoreció la formación de los océanos. Además, su incursión en el sistema solar interior pudo haber barrido otros planetas preexistentes, lo que habría dejado el camino libre para la gestación de la Tierra. Con todo, puede que llegue el día en que Júpiter arrase con todo lo que ayudó a crear. Tal vez dentro de millones de años provoque una nueva lluvia de cometas y asteroides sobre nuestro planeta, lo que causaría grandes cataclismos que harían hervir los océanos y abrasarían la biosfera.

Todos esos detalles pueden relacionarse hasta cierto punto con la naturaleza y el momento del misterioso nacimiento de Júpiter. Lo que se sabe con seguridad es que, hace algo más de 4500 millones de años, una nube fría de gas y polvo colapsó y dio lugar al Sol. Los restos de aquella nube acabaron formando un disco rotatorio, a partir del cual se constituyeron los planetas. Parece fácil que los mundos rocosos, debido a su pequeño tamaño, surgiesen por un proceso acumulativo «de menos a más» llamado acreción del núcleo; en él, las rocas pequeñas se habrían ido agrupando poco a poco a poco en cuerpos progresivamente mayores durante unos 100 millones de años. La mayoría de los investigadores piensa que Júpiter se formó de igual modo. Sin embargo, ello implicaría que tuvo que hacerlo mucho más rápido, agregando núcleos del tamaño de la Tierra en apenas 10 millones de años. Ese tiempo habría bastado para adquirir una gran atmósfera antes de que la intensa radiación de la joven estrella barriese gran parte del gas circundante.

Sin embargo, existe otra posibilidad. Los planetas gigantes podrían nacer de manera similar a como lo hacen las estrellas, a partir de una gran masa de gas, debido a un proceso conocido como inestabilidad de disco. Según esta hipótesis, algo semejante a Júpiter habría alcanzado la condición de planeta debido al colapso directo de una masa densa y fría de gas y polvo situada en la región exterior de un disco circunestelar. Hoy resulta casi imposible distinguir entre estas dos teorías sobre el origen de Júpiter, ya que cualquier indicio se encuentra literalmente sepultado bajo su densa y voluminosa atmósfera.

Por fortuna, hay otra manera de comprobar qué clase de proceso dio lugar a un planeta gigante: medir su temperatura. El colapso directo de una gran masa de gas sucedería con tal rapidez que una cantidad considerable de calor quedaría atrapada en el planeta durante largo tiempo. Por el contrario, un proceso de acreción originaría planetas gigantes que, aunque en un principio brillarían al rojo vivo, acabarían siendo relativamente más fríos. «A medida que el gas se precipita sobre un núcleo rocoso, la atmósfera que se encuentra por debajo obstaculiza la acreción posterior», explica Mark Marley, miembro de la colaboración GPI y experto en formación planetaria del Centro de Investigación Ames de la NASA que ha trabajado en la modelización de estos procesos. «Cuando el gas se frena, se produce una sacudida que libera la mayor parte de la energía del gas que cae, lo que enfría rápidamente el planeta. Por ello, una vez que concluye el proceso de aportación de gas, el planeta resultante estará más frío que si se hubiese formado por colapso directo», concluye el investigador.

Así pues, la temperatura de un planeta gigante parece «recordar» su mecanismo de nacimiento. Sin embargo, conforme el planeta envejece, más frío se vuelve y más vaga se torna su memoria. Con una edad de unos 4500 millones de años, hace ya largo tiempo que Júpiter borró todo rastro de su proceso

La mayoría de los planetas son como motas de polvo situadas junto a una bola de fuego termonuclear. Los jupíteres jóvenes, sin embargo, se parecen más a una brasa al rojo vivo que se enfría cerca de una hoguera

de formación. Sin embargo, los planetas gigantes con una edad inferior a pocos cientos de millones de años, como los que GPI y SPHERE intentan fotografiar en el infrarrojo, sí deberían conservar intactos sus registros térmicos. Al analizar cientos de estrellas jóvenes y brillantes cercanas, ambos proyectos podrán inferir la temperatura y la historia pasada de decenas de planetas gigantes. Tales investigaciones deberían aclarar el misterio de su formación, al tiempo que arrojarían luz sobre el proceso de gestación de los sistemas planetarios habitables, como el nuestro.

CÓMO FOTOGRAFIAR UN JÚPITER CALIENTE

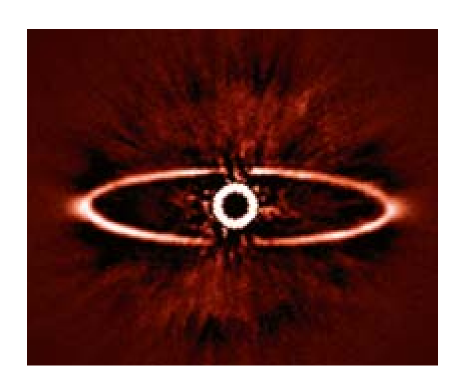
Cuando el equipo de GPI se prepara para observar la estrella HD 95086, un círculo monocromático emerge en una de las pantallas de Macintosh. Parece un fluido muy pixelado, semejante a un primer plano digitalizado de un río torrencial o a una televisión llena de interferencias.

«Lo que estás viendo es el viento», me explica el astrónomo. «No es más que luz estelar que ha pasado por una turbulencia atmosférica y ha incidido en uno de los detectores que controlan nuestra óptica adaptativa.» Esta técnica busca corregir los efectos de las perturbaciones atmosféricas mediante espejos deformables que cambian de configuración cientos o incluso miles de veces por segundo. Gracias a ello, algunos observatorios terrestres pueden captar imágenes que rivalizan con las de los telescopios espaciales. Pulsando unas pocas teclas y dando algunas órdenes a su equipo, Macintosh activa el sistema de óptica adaptativa del instrumento. Instalados bajo el telescopio de ocho metros, sus dos espejos deformables (uno de vidrio ordinario y que ejerce una función similar a un «altavoz de graves», y otro menor y con un diseño específico que hace las veces de «altavoz de agudos») ondulan y se curvan gracias a sus más de 4000 actuadores. La inclinación o elevación de sus superficies compensa el efecto de cada corriente o bolsa de aire transitoria que esparce la luz, gracias a lo cual se reconstruye casi a la perfección el rayo inicial. El resultado parece mágico: el círculo turbulento se ha convertido en un objeto suave, como si la atmósfera hubiese desaparecido de repente. HD 95086 es ahora un brillante resplandor en la pantalla. Pero a su lado no hay signos de ningún planeta.

Para verlo, Macintosh activa otro dispositivo: un coronógrafo. Este aparato elimina la mayoría de la luz estelar haciéndola pasar por una serie de máscaras que filtran el 99 por ciento de los fotones. Los que consiguen atravesar el filtro se focalizan y se dirigen hacia un espejo con un orificio central pulido con precisión atómica. Macintosh explica que la luz de la estrella incide sobre el orificio, mientras que la del planeta rebotará contra el espejo y penetrará en el interior del instrumento, donde alcanzará un espectrógrafo ultrafrío que separará la radiación en sus longitudes de onda constituyentes.

Sobre la pantalla aparece ahora un halo grumoso de luz blanca en torno a una profunda sombra central, situada donde debería estar HD 95086. Esos grumos, llamados «motas», se componen de la luz estelar parásita que se ha filtrado a través del coronógrafo; pueden ocultar un planeta o incluso hacerse pasar por uno. Para distinguir entre motas y planetas, los investigadores toman una secuencia de exposiciones en diversas longitudes de onda infrarrojas. Mientras miramos la pantalla, James Graham, catedrático de la Universidad de California en Berkeley, explica que la separación entre una estrella y las motas que genera resulta proporcional a la longitud de onda. Una mota aparecerá más cerca de la estrella para longitudes de onda menores, o más desplazadas hacia el azul, y más alejada para aquellas situadas hacia el rojo. «Así, cuando se observa la secuencia completa de longitudes de onda, las motas se moverán, pero el planeta no», aclara el investigador.

Macintosh pasa las exposiciones como si fueran los fotogramas de una película. El halo parece respirar, expandiéndose y contrayéndose a medida que todos los grumos se mueven al unísono. Todos menos uno: un solitario punto fijo de luz planetaria captado entre un mar de motas estelares. En menos de media hora, hemos pasado de ver el viento a contemplar un mundo que orbita alrededor de una estrella lejana. Un análisis posterior del espectro del planeta sugiere que brilla con una luz muy rojiza, tal vez como resultado de un exceso de polvo que dispersa la luz en su atmósfera superior. Un detalle pequeño pero apasionante de conocer si se piensa que hablamos de un planeta situado a 300 años luz de distancia.



OJO CÓSMICO: Esta imagen, obtenida por SPHERE tras filtrar la luz de la estrella HR 4796A, revela la existencia de un tenue anillo de polvo. Este podría haber sido esculpido por un planeta invisible.

No todos los objetos resultan tan complicados de observar. Algunas estrellas más brillantes y cercanas revelan sus secretos con mucha mayor facilidad. Con anterioridad, los investigadores solo necesitaron una única exposición de 60 segundos para captar una imagen de Beta Pictoris b, un joven planeta gigante caliente, situado a 63 años luz de la Tierra y que orbita alrededor de su estrella a casi el doble de distancia que la que media entre Júpiter y el Sol. La comodidad con que los expertos pudieron observarlo sugiere que el método de toma directa de imágenes podría estar convirtiéndose en algo habitual. Un generador de imágenes directas ligeramente más antiguo ya había captado una imagen similar de Beta Pictoris b en Gemini Sur, aunque necesitó más de una hora de observación y un exhaustivo tratamiento posterior de datos. Las nuevas imágenes permitieron al equipo de GPI estimar la órbita de Beta Pictoris b con una precisión sin precedentes. Aquel estudio reveló que, en 2017, el planeta podría pasar por delante de su estrella; un raro alineamiento con la línea de visión desde la Tierra que sería de gran ayuda para quienes desean aprender más sobre el lejano gigante.

En las horas restantes antes del amanecer, el equipo toma imágenes de estrellas binarias, de tenues discos de polvo e incluso de Titán, la luna de Saturno, escudriñada a través de su gruesa y brumosa atmósfera de hidrocarburos hasta llegar a su superficie llena de manchas. Al alba, cuando la luz del amanecer comienza a filtrarse por el horizonte, Macintosh se recuesta en su silla y suspira, agotado pero satisfecho.

La última noche de los seis días de trabajo, el equipo de GPI encuentra su primer planeta. Orbita en torno a una estrella de 20 millones de años a una distancia que dobla la que separa a Júpiter del Sol. Macintosh no es el primero en darse cuenta de su presencia. Robert de Rosa, estudiante posdoctoral de la

CORTESÍA DE JEAN-LUC BEUZIT ET AL./OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL/CONSORCIO SPHERE

Universidad de California en Berkeley, se percata de un punto oscilante al mirar por encima del hombro de otro compañero varias imágenes por lo demás anodinas. Observaciones posteriores muestran que el planeta posee una masa entre dos y tres veces mayor que la de Júpiter, así como una atmósfera repleta de metano y tan caliente que podría fundir el plomo. Se encuentra a 100 años luz de la Tierra, pero es lo más parecido a Júpiter que jamás hayan visto los astrónomos.

«Se trata del primer planeta descubierto que se asemeja más a una versión caliente de Júpiter que a una estrella muy fría», señala Macintosh. «Tal vez sea lo suficientemente joven para "recordar" su proceso de formación. Con más observaciones podríamos determinar su masa y edad, y tal vez averiguar si se formó por acreción del núcleo, como pensamos que hizo júpiter, o por colapso de una gran masa de gas, como una estrella.»

Al decírmelo, Macintosh me hace prometer que guardaré el secreto hasta que el equipo de GPI escriba los resultados y los presente para su publicación. «SPHERE podría observarlo muy fácilmente», afirma. «No sabemos si ya han estudiado esta misma estrella. Todos estamos nerviosos por que no nos roben la exclusiva.»

PRIMERA LUZ

Poco después del amanecer abandono Gemini Sur, tomo un avión hacia el norte, alquilo un coche y me apresuro por una solitaria autopista del desierto de Atacama para llegar a SPHERE antes de que caiga la noche. Justo después del ocaso llego al VLT, el observatorio en el que se encuentra instalado el instrumento. En una reducida sala de control, Beuzit, el jefe del proyecto, dirige a su equipo mientras comienza la larga fase de puesta a punto. Los astrónomos se inclinan sobre las pantallas de sus ordenadores, hablando tranquilamente en francés, alemán e inglés mientras intentan hacer caso omiso a las cámaras y micrófonos de un equipo de documentales. Beuzit merodea entre los puestos de control, sorbiendo café y parándose aquí y allá para escuchar y aconsejar. En una estantería cercana, una botella de Laurent-Perrier ya vacía luce en la etiqueta una inscripción garabateada con rotulador negro: «Primera luz de SPHERE».

El instrumento funciona de manera admirable durante la puesta a punto y logra generar bellas imágenes de todo tipo de objetos celestes; entre ellos, un tenue anillo de polvo alrededor de HR 4796A, una estrella de 8 millones de años situada a 237 años luz de la Tierra, en la constelación de Centauro. No obstante, a pesar de esas preciosas fotografías, Beuzit me comunica que SPHERE aún no está listo para descubrir nuevos planetas. Algo no va del todo bien con la óptica adaptativa del sistema. Fallan algunos de los actuadores, encargados de curvar un espejo deformable de 1377 piezas y un millón de euros. Nadie en el equipo sabe por qué. La solución definitiva, dice Beuzit, tal vez obligue a sustituir todo el espejo por uno nuevo y con otra tecnología de actuadores. A pesar de todo, el investigador se muestra optimista y asegura que tanto SPHERE como GPI cumplirán con creces sus objetivos. Mientras tanto, la puesta en marcha debe continuar. Finalizó a principios de este año con la presentación de un primer conjunto de observaciones científicas, incluidas varias imágenes de sistemas planetarios ya fotografiados con anterioridad.

Cuando pregunto sobre la rivalidad entre SPHERE y GPI, la primera reacción de Beuzit es sonreír y sorber café. Después habla con cautela. «Cuando ambos comencemos a descubrir nuevos planetas, nadie recordará quién fue el primero», asegura. «No digo que los estadounidenses y nosotros no vayamos a competir, pero Bruce Macintosh y yo nos conocemos desde hace quince años y los dos sabemos lo difícil que es esto. Celebramos nuestros éxitos y compartimos nuestras dificultades para mejorar ambos sistemas y preparar el camino a la próxima generación de observatorios y generadores de imágenes.»

«Estamos entrando en una nueva era», apunta Dimitri Mawet, catedrático del Instituto de Tecnología de California y científico principal de instrumentación en SPHERE. «Descubriremos muchas cosas maravillosas, pero también daremos un gran impulso a la óptica adaptativa. Eso será fundamental para la próxima generación de telescopios, que necesitarán esta clase de controles simplemente para mantener alineados sus gigantescos espejos.»

Uno de esos nuevos telescopios se construirá a tan solo 20 kilómetros de SPHERE, en la cumbre de 3000 metros del cerro Armazones. Poco después de mi visita, la cima del pico fue volada con explosivos con el objetivo de despejar el terreno para el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), uno de los tres observatorios de gran tamaño que han sido programados para comenzar a funcionar dentro de una década. Unido a la potencia sin precedentes de su espejo, que alcanzará los 30 o 40 metros, un sistema como SPHERE o GPI podría fotografiar no solo gigantes gaseosos, sino también planetas mil veces más tenues y potencialmente habitables en torno a estrellas más cercanas al Sol. Después, una misión espacial dedicada a la toma directa de imágenes podría investigarlos más a fondo y buscar en ellos señales de vida. Suponiendo, por supuesto, que tales mundos existan. Es la posibilidad de fotografiar un mundo similar lo que motiva a muchas de las personas que están detrás de proyectos como GPI y SPHERE.

Macintosh había manifestado lo mismo durante nuestras conversaciones en Gemini Sur: «Veo lo que estamos haciendo ahora como un paso en el camino para captar la primera imagen de otra Tierra. Antes o después tendremos esa fotografía. Y si algún día logramos saber qué fracción de planetas rocosos presentan características interesantes, como océanos y oxígeno atmosférico, y dicha fracción resulta ser diminuta, habremos aprendido algo importante. Puede que durante largo tiempo no suponga ninguna diferencia práctica para el progreso de nuestra civilización. Pero, desde un punto de vista filosófico, saber que nuestro planeta es el único de su clase en un radio de 1000 años luz hará que nos preocupemos un poco más por no estropearlo».

PARA SABER MÁS

Exoplanet detection techniques. Debra Fischer et al. en *Protostars and Planets VI*. University of Arizona Press, 2014.

First light of the Gemini planet imager. Bruce Macintosh et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 111, n.° 35, págs. 12.661-12.666, 2 de septiembre de 2014.

SPHERE science verification. Bruno Leibundgut et al. en *Messenger*, n.° 159, págs. 2-5, marzo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La búsqueda de vida en otros planetas. J. Roger, P. Angel y Neville J. Woolf en *IyC*, junio de 1996.

Exoplanetas habitables. Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia en *IyC*, octubre de 2010.

El amanecer de los exoplanetas. Michael D. Lemonick en *IyC*, septiembre de 2013.

Hacia el primer exoplaneta con vida. Jonay I. González Hernández, Rafael Rebolo López y Enric Palle en *IyC*, marzo de 2014.



EDUCACIÓN

LA EDUCACIÓN CIENTÍFICA DEL SIGLO XXI: RETOS Y PROPUESTAS

¿Se ha de enseñar hoy la misma ciencia y de la misma forma en que nos la enseñaron a nosotros?

Neus Sanmartí e Iván Marchán Carvajal

EN SÍNTESIS

Los cambios sociales y tecnológicos que hemos vivido en los últimos decenios están obligando a replantear numerosos aspectos de la enseñanza de las ciencias. Se están desarrollando diversos proyectos innovadores que pretenden adaptar la escuela al mundo de hoy.

La comunidad educativa defiende que el objetivo de la educación debiera ser la alfabetización científica de la población y el fomento del pensamiento crítico. Las organizaciones empresariales, en cambio, prefieren preparar a los jóvenes para satisfacer las demandas del mercado laboral.

Si bien ambas propuestas parten de valores distintos, coinciden en que debe potenciarse el trabajo por proyectos interdisciplinarios, el desarrollo de competencias, la motivación y el interés del alumnado y la conexión de la escuela con el mundo real.

MARIO WAGNER

Neus Sanmartí Puig es profesora emérita de didáctica de las ciencias en la Universidad Autónoma de Barcelona. Forma parte del grupo de investigación en Lenguaje y Enseñanza de las Ciencias (LIEC) del mismo centro. Su investigación actual se centra en el diseño curricular para la enseñanza de las ciencias y la evaluación.

Iván Marchán Carvajal, profesor de física y química en el Instituto Europa de Hospitalet de Llobregat, es también profesor asociado de la facultad de educación de la Universidad de Barcelona y miembro del grupo LIEC. Su investigación se centra en el aprendizaje y la enseñanza de la química a través de la contextualización.





Como cada año en está época, las aulas de escuelas e institutos han vuelto a llenarse de estudiantes dispuestos a iniciar un nuevo curso. En ellas, podríamos imaginar a grupos de niños y adolescentes, sentados delante de su pupitre y escuchando atentos las lecciones magistrales que impartirán los profesores y mediante las cuales (se supone que) irán ampliando sus conocimientos sobre las principales disciplinas.

Sin embargo, esa escena está quedando cada vez más obsoleta; comienza a formar parte del pasado —quizás el que vivió el lector, o sus padres o abuelos—. Los cambios tecnológicos y sociales que hemos vivido en los últimos decenios están obligando a replantear numerosos aspectos del sistema educativo. ¿Qué deberían aprender los estudiantes? ¿Conocimientos que les ayuden a convertirse en ciudadanos alfabetizados, responsables y críticos, o en trabajadores competentes según las necesidades del mercado laboral actual? ¿Cómo podemos mejorar el interés, la motivación y la comprensión de los alumnos? En este artículo presentamos algunas de las principales cuestiones que se están abordando con el propósito de adaptar la escuela al mundo del siglo xxi, centrándonos en las ciencias, una de las áreas curriculares de mayor complejidad.

LAS PRIMERAS INNOVACIONES DIDÁCTICAS

Actualmente nadie duda de la importancia de enseñar ciencias a todos los estudiantes hasta la finalización de los estudios obligatorios (secundaria). Sin embargo, esta concepción es relativamente reciente: la generalización del estudio de las ciencias tuvo lugar después de la Segunda Guerra Mundial. Antes, la enseñanza de la física, la química o la biología a alumnos adolescentes se hallaba muy vinculada a la preparación de estos para acceder a la universidad o a estudios profesionales y, por tanto, solo una minoría de chicos —y todavía un número menor de chicas—, muy seleccionada por su estatus social, estudiaba estas disciplinas. Se considera que el lanzamiento por la Unión Soviética en 1957 del *Spútnik*, el primer satélite artificial, marcó un antes y un después en la enseñanza de las ciencias, ya que puso de manifiesto la necesidad de disponer de personas preparadas para afrontar los nuevos retos tecnológicos.

En los años sesenta del siglo pasado surgieron, sobre todo en EE.UU. y Gran Bretaña, numerosos proyectos innovadores para mejorar la alfabetización científica de los estudiantes. El «Estudio para la Mejora del Currículo en Ciencias» (*Science Curriculum Improvement Study*), dirigido por Robert Karplus, profesor de física en la Universidad de California en Berkeley, ofrecía un marco de conceptos científicos fundamentales relacionados con la experiencia de los alumnos con los fenómenos naturales; organizado en doce unidades didácticas, iba dirigido a estudiantes de primer a sexto curso de primaria. Para los alumnos de educación infantil y primaria, la comisión de educación de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS) desarrolló el programa «Ciencia: Un enfoque basado en procesos» (*Science: A Process Approach*). Destacaron también los proyectos de la Fundación Nuffield, la colección «Sistemas químicos» (*Chemical Bond Approach Project*) y los materiales para bachillerato elaborados por el Comité para el Estudio de la Física (*Physical Science Study Committee*), del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Pese a la calidad y el interés de todos esos programas, se comprobó que los resultados del aprendizaje eran insatisfactorios y que no estimulaban las vocaciones científicas (los alumnos seguían sin optar por el estudio de las ciencias cuando podían escoger en su currículo entre disciplinas diferentes). Más de cincuenta años después, estos dos problemas continúan sin resolverse, a pesar de la investigación llevada a cabo en didáctica de las ciencias y de las propuestas innovadoras que se han ido sucediendo.

En general, podría afirmarse que, en educación, las «soluciones» llegan siempre tarde, ya que los cambios en la sociedad se producen a una velocidad muy superior a la de la implementación generalizada de las innovaciones didácticas. Solo hay que pensar en cómo la información se encuentra al alcance de todos a través de Internet y, en cambio, muchas de las clases actuales se centran todavía en transmitir dichas informaciones y memorizarlas, o en cómo hoy los estudiantes aprenden ciencias fuera de la escuela (en contextos informales como museos, bibliotecas, programas de televisión, Internet, etcétera), sin que ello haya cambiado lo que se enseña en clase.

Además de los problemas derivados del desajuste entre el sistema educativo y las dinámicas sociales, la enseñanza de la ciencia debe superar también ciertas dificultades en el plano cognitivo. Aprender ciencias no es tarea fácil. Por un lado, exige cambiar las ideas que desde que nacemos vamos construyendo en el marco de la vida cotidiana, conceptos muy persistentes y distintos de los consensuados por la ciencia actual. Por otro, requiere ser capaces de abstraer ideas clave, muy potentes, complejas y generales, de forma que puedan ser utilizadas en

la interpretación y resolución de problemas nuevos. En este sentido, no resulta extraño que, tal como pone de manifiesto el estudio realizado en 2005 por Edgar W. Jenkins y N. W. Nelson, de la Universidad de Leeds, muchos estudiantes expresen: «Las ciencias son interesantes, pero no son para mí».

¿PARA QUÉ ENSEÑAR Y APRENDER CIENCIAS? UNA CUESTIÓN SOCIOPOLÍTICA

Más allá de los retos didácticos comentados hasta ahora, una nueva pregunta centra desde hace unos años el debate en la comunidad educativa: ¿para qué enseñar ciencias a la población? La cuestión es más compleja de lo que pueda parecer a simple vista y guarda una estrecha relación con la política, la economía y los valores de nuestra sociedad.

Desde la investigación en didáctica se defiende que el objetivo básico de la enseñanza de las ciencias para toda la población debiera ser la alfabetización científica. Su finalidad sería, por un lado, fomentar la capacidad de argumentar formas de actuar basadas en el conocimiento científico; por otro, desarrollar el pensamiento crítico ante la proliferación de pseudociencias (homeopatía, aromaterapia, medicina «cuántica», kinesiología, reiki, etcétera), movimientos anticientíficos (antivacunas, negacionistas del cambio climático), publicidad engañosa o estafas (como los aparatos caseros de desintoxicación iónica). En esta línea se están desarrollando programas de «ciencia en contexto» o sobre «temas sociocientíficos», entre otros. Hallamos ejemplos pioneros en los proyectos Salters de Gran Bretaña, diseñados e impulsados por la Universidad de York y la Fundación Nuffield, y cuyo principio didáctico se resume en que la enseñanza de las ideas clave del currículo debe promoverse cuando estas sean necesarias para interpretar o resolver problemas relevantes socialmente. Otro aspecto destacado de estos proyectos es que ponen el acento en la necesidad de aprender no solo de ciencia, sino también sobre cómo la ciencia genera nuevos conocimientos y los valida. En un mundo globalizado en el que la ciencia puede ir de la mano de intereses económicos es importante ayudar al alumnado a entender el significado preciso de expresiones habituales como «científicamente probado» y a ser conscientes de que la validez de una afirmación debe demostrarse mediante pruebas.

Desde instituciones como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en Europa o la coalición «Change the Equation» en EE.UU., cuyas finalidades son el desarrollo económico y dar respuesta a las necesidades de las empresas, la cuestión de «para qué» enseñar ciencias se enfoca de otro modo. Según estos organismos, la finalidad de la educación es preparar a los jóvenes para que puedan afrontar las nuevas demandas de la economía. A través de sus estudios y propuestas, como las pruebas PISA (por las siglas, en inglés, de «Programa para la Evaluación Internacional de los Estudiantes») que impulsó la OCDE en el año 2000, pretenden influir en los currículos escolares, en «qué» se enseña y en «cómo» se enseña. Así, la visión competencial del currículo que promueve PISA ya ha sido incorporada en la gran mayoría de sistemas educativos de todo el mundo. En fecha más reciente, ha surgido el programa STEM (por las siglas, en inglés, de «Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas»), que defiende un currículo interdisciplinar y metodologías didácticas basadas en el trabajo por proyectos, resolución de problemas o realización de investigaciones y, muy especialmente, en el uso de todo tipo de tecnologías. Si bien este programa se ha centrado inicialmente en la integración de disciplinas científico-tecnológicas, actualmente ya se habla de STEAM, donde la *A* se refiere a *arte*, y de muchas otras siglas que incorporan más ramas del saber. El porcentaje de escuelas iberoamericanas que participan en esta iniciativa es aún pequeño, pero está en expansión. Así se evidenció en el primer congreso internacional sobre STEM, celebrado en el museo Cosmocaixa de Barcelona el pasado mes de abril y en el que se presentaron experiencias de centros educativos de todo el mundo.

PROYECTOS INTERDISCIPLINARIOS Y CONEXIÓN CON EL MUNDO REAL

Aunque los dos planteamientos señalados responden a programas y líneas de investigación con objetivos divergentes, comparten ciertas propuestas metodológicas. Veamos en qué consisten estas semejanzas.

Tanto la estrategia basada en la alfabetización científica como la centrada en las necesidades del mercado laboral apuestan por conectar el conocimiento que debe aprender el alumno con el mundo real. En el primer caso, ese conocimiento debe permitir al propio estudiante dar respuesta a retos o preguntas que pueda plantearse fuera de la escuela y a lo largo de la vida; en el segundo caso, se trata de un conocimiento que pueda aplicarse a la generación de productos o servicios con valor económico.

Aunque la propuesta del sector educativo se centra sobre todo en temáticas de índole social y la del sector empresarial en retos tecnológicos, ello no impide que en muchos casos haya confluencia entre ambas orientaciones. Puede que una solución técnica pase por demostrar que es responsable desde el punto de vista ambiental (dimensión social), o que el análisis y argu-

COMPETITIVIDAD

¿Qué significa ser competente en ciencias?

Preocupados por la competitividad laboral de los ciudadanos, los países miembros de la OCDE impulsaron en el año 2000 la creación de un programa de evaluación internacional de los estudiantes con el propósito de influir en los currículos escolares. Nos referimos a las famosas pruebas PISA, cuya visión competencial ya ha sido incorporada en la mayoría de sistemas educativos de todo el mundo.

Pero ¿qué significa ser competente... en ciencias? Según el marco conceptual para las pruebas PISA 2015, que interpreta esta idea en clave de alfabetización científica (*scientific literacy*), el estudiante competente científicamente es aquel con capacidad para involucrarse reflexivamente en temáticas relacionadas con la ciencia y con las ideas de la ciencia. Es decir, que sabe:

- **Explicar fenómenos científicamente**
Reconocer, ofrecer y evaluar explicaciones para un amplio espectro de fenómenos naturales y tecnológicos.
- **Evaluar y diseñar investigaciones científicas**
Describir y evaluar investigaciones científicas y proponer métodos para abordar científicamente la respuesta a preguntas.
- **Interpretar datos y pruebas científicamente**
Analizar y evaluar datos, afirmaciones y argumentos de diversa naturaleza y redactar conclusiones científicas adecuadas.

FUENTE: *PISA 2015 SCIENTIFIC LITERACY ASSESSMENT FRAMEWORK*. OCDE, OCTUBRE DE 2012 (*competencias*)

EL NUEVO RUMBO DE PISA

Cómo evaluar el espíritu de equipo

Peg Tyre

La pasada primavera, cuando decenas de millares de quinceañeros de ambos sexos ocuparon sus puestos para las pruebas PISA, se verificaron sus destrezas en lectura, matemáticas y ciencias. Pero también tuvieron que habérselas con una serie, novedosa y controvertida, de cuestiones concebidas para medir «destrezas de resolución cooperativa de problemas». No consistieron en test de respuesta electiva ni en cuestiones acompañadas de justificación; los examinandos tuvieron que de registrar resultados de juegos, ensamblar rompecabezas y realizar experimentos con la ayuda de un «colega» virtual, con el que se comunicaron mediante cajas de chat. El nuevo test es aún experimental, pero los responsables de PISA consideran que los resultados de estos nuevos problemas servirán de acicate para que los Gobiernos preparen mejor a sus jóvenes para desenvolverse en la economía global.

Algunos critican que, con esta prueba, PISA ha dado un paso atrás y ha resucitado un antiguo y acerado debate sobre si es factible enseñar a pensar de forma crítica y a trabajar en equipo, y sobre si estas competencias pueden aprenderse con independencia de los contenidos.

A juicio de Jenny Bradshaw, directora sénior de PISA y supervisora de las pruebas, resulta imperativo que las escuelas se adapten al rápido avance de las innovaciones tecnológicas; el nuevo dominio examinado se encamina hacia este fin. «La capacidad para trabajar con compañeros invisibles, especialmente en línea, resultará fundamental para el éxito profesional. Pues así será como funcionen, y cada vez más, el mundo y los puestos de trabajo.»

Se trata de una novedad para las pruebas PISA, coordinadas por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), coalición de 34 países cuya brújula es la industria. Desde su implantación en 2000, estas han venido midiendo la habilidad de los estudiantes para comprender información escrita y aplicar matemáticas y ciencias a situaciones de la vida real. Las calificaciones que obtienen los países, y los titulares que en ellos provocan, se tornan rápidamente en detonantes para políticas orientadas hacia la competitividad internacional. Las notas de PISA han provocado, al menos en parte, un centón de propuestas de reforma escolar en EE.UU. y en Europa. Los mediocres resultados estadounidenses contribuyeron a que el presidente Obama sintiera necesario advertir, ya en 2009, que los estudiantes de EE.UU. tenían «que saltar del pelotón al grupo de cabeza» en diez años.

En 2008, grandes corporaciones como Cisco, Intel y Microsoft, preocupadas por la deficiente preparación para asumir funciones clave de los aspirantes a un puesto laboral, comenzaron a financiar un grupo llamado ATC21S (cuya traducción sería «Valoración de competencias para el siglo XXI»), con el propósito de identificar y robustecer las «destrezas para el siglo XXI». A grandes rasgos, estas serían la capacidad de pensamiento crítico y creativo, de trabajo en colaboración y de adaptación a la evolución tecnológica en la empresa y en la sociedad. ATC21S lleva años instando a PISA para que empiece a evaluar algunas de estas competencias y para que busque expertos que definan una estructura para investigar cómo llevar a cabo tales valoraciones.

Hace tres años, en 2012, constaban ya en el examen PISA ciertas cuestiones que —se suponía— servirían para averiguar la destreza de los examinandos al resolver problemas. Durante la preparación del examen se concluyó que una economía global e interconectada requiere un conjunto de competencias más concreto todavía, entre estas, la resolución de problemas en grupo, mediada por Internet. El PISA de este año enfocó su microscopio sobre estudiantes de 51 países, para indagar su capacidad en resolución cooperativa de problemas.

Las cuestiones del test son alternativamente amenas y frustrantes. Aunque los investigadores de ATC21S creen que

---

mentación de un tema sociocientífico comporte la generación de una herramienta que permita compartir y debatir argumentos en la Red (dimensión tecnológica).

Todos los programas innovadores tienen un fuerte componente interdisciplinario y suelen abordar el aprendizaje de conocimientos de distintas áreas de forma interrelacionada (incluso mediante la colaboración de alumnos de diferentes edades). En algunos centros escolares desaparecen los horarios por asignaturas y la actividad de los estudiantes se organiza alrededor de la realización de proyectos, problemas o investigaciones, talleres, etcétera, en cuyo marco se aprenden los conocimientos de las distintas disciplinas que se necesitan para resolver los problemas. En esta línea, Finlandia ya ha anunciado que su nuevo currículo de 2016 comportará el trabajo conjunto y simultáneo de profesores de diferentes áreas, ya que se enfatizará el trabajo por proyectos. En España, estas iniciativas aún no están siendo estimuladas desde la administración pública; se aplican solo en algunos pocos centros escolares (como el Instituto Quatre Cantons de Barcelona), en los que el equipo directivo ha priorizado esta metodología en su proyecto. En general, se trata de centros de reciente creación, lo que facilita la aplicación de innovaciones —en escuelas con una trayectoria más larga, los cambios son más difíciles, debido a que no suele haber consenso entre todos los profesores para poderlos implementar.

Otra de las características comunes de ambos enfoques educativos es el énfasis en la visión competencial del aprendizaje, es decir, en la voluntad de desarrollar en los jóvenes la capacidad para movilizar saberes diversos en la resolución de un problema, la comprensión de una situación o la toma de decisiones sobre temas de actualidad (pensemos en las vacunas, la fracturación hidráulica o *fracking*, la energía nuclear, la introducción de especies invasoras en un entorno, etcétera). Las «competencias» definidas por el programa PISA, en su última edición de 2015, inciden en la capacitación para evaluar explicaciones científicas, investigaciones, datos y argumentos, ya que considera que no necesariamente todas las personas desarrollarán proyectos de investigación, pero sí que todo el mundo debería ser capaz de analizar críticamente los estudios realizados por otros y dados a conocer a través de la prensa, en el lugar de trabajo u otros medios.

Las nuevas metodologías didácticas inciden también en una mayor apertura de la escuela y en la colaboración con entidades externas. Para realizar sus proyectos, los estudiantes pueden



lo mejor sería comprobar los problemas colaborativos mediante colaboraciones reales, en los PISA cada alumno cuenta con un colega virtual llamado Abby. Se pide que entre ambos determinen, por ejemplo, las condiciones óptimas para los peces de un acuario, siendo el estudiante quien controle el agua, la decoración y la iluminación, mientras que Abby se ocupa de la nutrición, el número de peces y la temperatura. Para superar la prueba, el alumno debe alcanzar acuerdos sobre métodos para resolver el problema, responder a objeciones, aclarar malentendidos, compartir información sobre ensayos previos y, finalmente, sintetizar los resultados.

Multitud de críticos oponen que el nuevo enfoque es un disparate. Tom Loveless, investigador en didáctica de la Institución Brookins, objeta: «¿Existe acaso un conjunto independiente de competencias —en este caso, la resolución cooperativa de problemas— transversal y transferible entre distintos dominios de conocimiento? Las destrezas de biólogos e historiadores para resolver los problemas de su ciencia, ¿son las mismas? ¿Son diferentes? Desde John Dewey, otros pedagogos innovadores han mantenido que sí lo son. Pero lo cierto es que no lo sabemos».

Los sistemas escolares que se propongan preparar para el futuro a sus alumnos deberían ayudarlos a dominar las matemáticas complejas, las ciencias y la comprensión lectora, en lugar de dedicar recursos a promocionar conceptos nebulosos.

Bradshaw, de PISA, reconoce que, en efecto, estos dominios innovadores son cuestionables, pero ella y su equipo consideran que el experimento vale la pena. Y mientras los investigadores de PISA efectúan estudios de validación y trabajan con grupos focales sobre la resolución cooperativa de problemas, otros se ocupan ya de la nueva frontera de PISA. Bradshaw sostiene que, en 2018, habrán conseguido un método válido de medición de la «competencia global».

Es un hecho que se enseña lo que será exigido en los exámenes. Por ello, ATC21S se está preparando para atender los lamentos de países que reciban calificaciones bajas. Ofrecen para ello vídeos de clases en las que los investigadores afirman que maestros y alumnos están haciendo lo debido. También ha preparado un MOOC (un curso en línea abierto y masivo) para la formación de docentes, que les prepara para llevar a sus clases la resolución cooperativa de problemas. De los 30.000 matriculados, una cuarta parte ya lo ha terminado.

Peg Tyre, *periodista, está especializada en educación. Es autora de* The good school *y de* The trouble with boys. *También es directora de estrategias para la Fundación Edwin Gould, que invierte en organizaciones que facilitan el acceso de estudiantes sin medios económicos a estudios superiores.*

partir de propuestas de institutos de investigación, museos, empresas o servicios municipales, y realizar parte de su trabajo en estas instituciones. Por ejemplo, el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC colabora con diversos centros educativos y acuerda con ellos la realización de proyectos que se traducen en el diseño de exposiciones por parte del alumnado u otras actividades; el instituto ofrece un acompañamiento directo al profesorado y, en algunos casos, también a los estudiantes, que realizan observaciones y recogen datos en el centro de investigación. En este sentido, se habla de «clase invertida» (*flipped classroom*): los estudiantes recogen los datos e informaciones fuera del aula y también visionan vídeos o leen escritos en su casa, mientras que en la escuela se realizan los «deberes», es decir, se reelaboran las ideas y los datos para generar buenos argumentos y pruebas, resolver los problemas y asimilar el conocimiento. Ello posibilita que la tarea del docente se centre en ayudar al alumnado a superar sus dificultades y no en la transmisión de informaciones.

Retomando el estudio de Jenkins y Nelson, lo que pretenden las nuevas propuestas didácticas es conectar con el alumno, facilitar que este encuentre sentido al aprendizaje de las ciencias y ayudarle a responder la pregunta: «¿Para qué sirve aprender ciencias y matemáticas?». En las clases centradas en el aprendizaje por repetición, los estudiantes curiosos y creativos no hallan sentido a lo que se les quiere enseñar y se aburren; y los sociables, a los que le gusta aprender con los demás, tampoco encuentran motivación. Todas las investigaciones ponen de manifiesto que estos estudiantes pierden interés y creen que no vale la pena realizar el esfuerzo que requiere el aprendizaje de las ciencias. Por ello, desde todas las nuevas propuestas se incide en que los alumnos se cuestionen, imaginen, se planteen retos y pongan a prueba sus planes, individualmente pero, sobre todo, en equipos heterogéneos, colaborando con personas con diferentes ideas, formas de trabajar y capacidades.

Con el propósito de avanzar en el diseño de las nuevas propuestas curriculares, los investigadores en didáctica de las ciencias están tratando de resolver una serie de cuestiones. A continuación se describen seis de las más relevantes.

¿CUÁLES SON LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS BÁSICOS NECESARIOS?

Los expertos están de acuerdo en que los listados de conceptos atomizados que configuran buena parte de los currículos actua-



les ya no tienen sentido. Veamos un ejemplo de este enfoque «anticuado» en la Ley Orgánica para la Mejora de la Calidad Educativa (LOMCE). Según esta, los estudiantes de secundaria (ESO) deberían saber, en relación al estudio de la materia, catorce ideas básicas; entre ellas, las propiedades de la materia, los estados de agregación, las leyes de los gases y las diferencias entre sustancias puras y mezclas. Los libros de texto se adaptan al estilo de este listado, de forma que cada apartado hace referencia a una de las ideas y los estudiantes pueden repetir más o menos su contenido en exámenes que las evalúan por separado. Obviamente, el aprendizaje de ideas aisladas no garantiza que estas puedan usarse de manera conjunta cuando deba abordarse el análisis de un problema real. Tampoco parece razonable pedir al alumnado que memorice cierto tipo de informaciones que pueden encontrarse fácilmente en Internet.

Con todo, para poder interpretar, explicar, predecir, criticar y actuar de forma responsable en situaciones de la vida cotidiana y profesional se necesitan conocimientos de ciencia y sobre la práctica científica. ¿Cuáles deberían ser, pues, esos conocimientos? ¿Cómo seleccionarlos?

Una de las opciones en las que trabajan los investigadores actualmente se basa en el uso de «grandes ideas» o modelos de la ciencia, constructos holísticos que engloban conceptos centrales y los procesos que los han validado a lo largo de la historia de la ciencia. Entre ellos encontraríamos, por ejemplo, los modelos «cambio químico» (¿qué cambia y qué no cambia cuando se obtienen nuevas sustancias a partir de otras?) y «ser vivo» (¿qué es la vida?). Estas «ideas clave» deberían ser pocas, muy generales y seleccionadas tanto por su relevancia en la historia de la ciencia como por su potencialidad para explicar fenómenos muy diversos.

El objetivo final del aprendizaje es que el alumno sea capaz de activar el conocimiento adquirido cuando tenga que actuar en otras situaciones, actuales y futuras.

A lo largo de la escolaridad, a partir de esas grandes ideas se puede profundizar en otras ideas subordinadas. Si bien hay acuerdo en la necesidad de alcanzar un nivel mínimo, o estándar, de conocimientos para toda la población, el grado de desarrollo y profundización de los mismos dependería de decisiones escolares, en función de los proyectos que se desarrollen y de las características e intereses del alumnado.

Los niveles mínimos que se están definiendo en la mayoría de los nuevos currículos son muy diferentes de los antiguos; se relacionan con lo que los jóvenes deberían ser capaces de hacer a partir de ellos e incluso se precisa qué ideas no formarían parte de la evaluación en cada etapa. Así, la enumeración de los conocimientos no se limita a un título, sino que se concreta en frases que expresan la idea básica que se debería trabajar en el aula y, muy especialmente, lo que deberían saber hacer los estudiantes a partir de ella. Por ejemplo, en los nuevos estándares del currículo estadounidense (*Next generation science standards*) para los alumnos de quince años se indican solo cuatro ideas básicas que estos han de demostrar que comprenden en relación a «la estructura y las propiedades de la materia». Una de ellas concreta: «Desarrolla un modelo para predecir y describir cambios en el movimiento de las partículas, temperatura y estado de las sustancias puras cuando se añade o elimina energía térmica». Y se clarifica que se enfatizarán los argumentos cualitativos y también el tipo de sustancias puras que deberán analizarse (agua, dióxido de carbono, helio), entre otros aspectos.

¿CÓMO SE APRENDEN CONOCIMIENTOS ABSTRACTOS A PARTIR DE PROBLEMAS CONTEXTUALIZADOS?

Otro aspecto del sistema actual de enseñanza que no acaba de estar bien resuelto es la relación entre el aprendizaje de conocimientos científicos y su contexto. A menudo, las ideas que se enseñan no son necesarias para resolver el problema planteado o para diseñar un artefacto, o bien son poco significativas. En muchos casos, el contexto no es más que un mero pretexto para enseñar lo de siempre y, además, como siempre. Los estudiantes españoles que participaron en las pruebas de acceso a la universidad en 2011 recordarán que en uno de los problemas de física se pedían los cálculos típicos de frecuencia y longitud de onda del sonido que emite una vuvuzela, un instrumento musical que se popularizó durante el Mundial de Fútbol de Sudáfrica. La referencia al instrumento era totalmente anecdótica, ya que no afectaba a una posible toma de decisiones derivada de los cálculos que se pedían. Además de no ayudar a la comprensión del problema, este tipo de contextos «estériles» pueden incluso llegar a causar confusión.

En el marco de un proyecto, el alumnado debería poder construir un conocimiento que fuera general y válido para interpretar y actuar en el marco de ese proyecto y de muchos más. Pero si los conceptos se enseñan a medida que son necesarios para entender mejor la situación o problema, puede suceder que los conocimientos científicos que se vayan aprendiendo sean muy diversos y que carezcan de una relación explícita entre sí, por lo que se puede caer de nuevo en un currículo atomizado.

Los estudios actuales sobre progresión en el aprendizaje científico buscan dar respuesta a ese problema. Demuestran que la construcción de las grandes ideas de la ciencia requiere de procesos de modelización complejos y bien secuenciados. Cada nuevo concepto necesita cuestionar y reformular concepciones previas alternativas y apropiarse de los puntos de vista de la ciencia actual, poco a poco y en un cierto orden, transitando de las ideas más simples a las más complejas y abstractas. En este ámbito, cabe destacar el proyecto 2061 de la AAAS, que elaboró unos mapas de progresión de las ideas clave de la ciencia a lo largo de las diferentes etapas formativas, desde la educación infantil al bachillerato; el currículo de Australia se basó en dicha propuesta.

¿CÓMO SE APRENDE A TRANSFERIR LO APRENDIDO?

Como consecuencia de los problemas anteriores, se formula un tercero relacionado con la transferencia del conocimiento: ¿de qué modo el estudiante aprende a aplicar el saber aprendido en el marco de un determinado contexto en otros, imprevisibles y complejos? Es evidente que el objetivo final del aprendizaje en la etapa escolar no es tanto que el alumno sea capaz de resolver un determinado problema real, explicar un hecho o diseñar y construir algún artefacto, como el de que sea capaz de activar ese conocimiento cuando tenga que actuar en otras situaciones, actuales y futuras.

Pero ¿qué se necesita aprender para ser capaz de transferir ese conocimiento? Y ¿cómo? Los estudios muestran que, a






CONEXIÓN CON LA CIENCIA REAL: **Numerosos proyectos de colaboración entre centros de investigación y escuelas e institutos permiten a los estudiantes salir del aula y conocer de primera mano la actividad científica. En las fotografías: unos participantes de los Campus Científicos de Verano tratan de montar una pila de combustible en un taller sobre energía en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Química de la Universidad Rovira i Virgili (*a*); unos alumnos del programa «Locos por la ciencia» aprenden a trabajar en una cámara de hipoxia en el Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona (*b*); un grupo de participantes del programa ESCOLAB estudian ciertas propiedades fisicoquímicas en la nanoescala con una investigadora del Grupo de Nanopartículas Inorgánicas del Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología (*c*); unos alumnos del programa MAGNET participan en la disección de una tintorera en un taller sobre tiburones en el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC (*d*).**

UNIVERSIDAD ROVIRA I VIRGILI (*a*); LUCA TANCREDI BARONE, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN BIOMÉDICA DE BARCELONA (*b*); INSTITUTO CATALÁN DE NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA (*c*); ELISABETTA BROGLIO, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR (*d*)

partir de los sistemas de enseñanza clásicos, los estudiantes transfieren saberes específicos parciales pero presentan dificultades para activar el modelo teórico general y aplicarlo en contextos diversos. Por ejemplo, pueden haber trabajado las funciones en clase de matemáticas y en las de ciencias ser capaces de aplicar algún aprendizaje (representar gráficamente datos experimentales que relacionan dos variables), pero no saber reconocer si en un nuevo problema real la relación entre las variables es funcional.

Sin embargo, parece ser que cuando el estudiante ha tomado consciencia del modelo teórico (es capaz de expresarlo con palabras, representaciones gráficas o simulaciones), entonces puede activarlo para plantearse buenas preguntas en nuevas situaciones y ser capaz de buscar e interpretar la información que encuentra. Por ejemplo, si ha aprendido que todo ser vivo respira para poder obtener la energía necesaria para la vida, en una investigación sobre un ecosistema quizá se pregunte: «¿Cómo respira el tronco de un árbol?» —porque, si está vivo, ha de respirar—. Si el estudiante tiene un conocimiento general de qué se entiende por respirar, aprendido en un contexto determinado (¿es cierto que se han de sacar las plantas de una habitación por la noche?), contará con información más significativa para responder. En cambio, si solo ha adquirido un conocimiento parcial sobre cómo respiran las hojas, los estomas, etcétera, le resultará más difícil interpretar nuevos contextos. Por tanto, hay una relación entre disponer de un modelo teórico potente y general, y la capacidad de generar «buenas preguntas». De hecho, el alumno que plantea una buena pregunta demuestra que es capaz de transferir el conocimiento.

¿SIRVE CUALQUIER CONTEXTO O PROBLEMA?

Otro de los retos de la didáctica actual corresponde a la selección de los contextos. Un buen contexto debe promover la implicación y motivación del alumnado —que es muy diverso en intereses y capacidades— y, al propio tiempo, posibilitar la construcción de las ideas clave de la ciencia. Los expertos debaten todavía sobre ciertas cuestiones: ¿cualquier contexto, problema o investigación es útil? ¿Qué relación debería haber entre el contexto y los conocimientos que deben aprenderse? ¿Ha de utilizarse el mismo contexto para todos los estudiantes de un grupo o clase?

Los partidarios de una organización del trabajo en el aula que posibilite que cada estudiante aborde su propio proyecto desde el inicio, ya sea individualmente, por parejas o en grupos reducidos, sostienen que así se asegura la motivación de todos. Sin embargo, se ha demostrado que un conocimiento significativo no se descubre investigando, ni tampoco se aprende leyendo textos, sino que su aprendizaje requiere la aplicación de procesos que tengan en cuenta las ideas previas y el modo en que se progresa en dicho conocimiento. Es por ello por lo que la experta en didáctica Rosalind Driver criticó, ya en 1983, la famosa sentencia «Escucho y olvido, veo y recuerdo, hago y comprendo», completándola con «... comprendo lo que ya comprendía». Es decir, las explicaciones que se generan solo a partir de la observación y experimentación están condicionadas por nuestras ideas previas, que acostumbran a ser alternativas a las de la ciencia actual. Se ha comprobado que el problema de la motivación no reside en que los estudiantes escojan los temas de los proyectos o investigaciones, sino en que los que se les propongan realmente recojan sus intereses y les posibiliten aprender saberes sobre los que hasta ese momento ni se podían preguntar.

Y no terminan aquí los interrogantes relacionados con los contextos. Se discute también si han de ser relevantes socialmente (es decir, si han de preparar al alumno para poder actuar en relación a problemas comunitarios como la salud o el ambiente) o si deben orientar, en el caso de la educación secundaria, hacia un posible futuro profesional. Muchas veces los estudiantes sienten curiosidad por temáticas que están presentes en los medios de comunicación (dinosaurios, animales monstruosos, Fórmula 1), pero, como ya decía el pedagogo Roger Cousinet, no es lo mismo curiosidad que interés, ni tampoco cualquier tema posibilita la apropiación de valores, ni el acceso a campos del saber que no se hallan presentes en la televisión.

¿CÓMO HA DE SER LA EVALUACIÓN?

Aunque muchas veces los estudiantes trabajan en el marco de proyectos o investigaciones, las pruebas que pretenden evaluar su aprendizaje continúan basándose en preguntas reproductivas, simples y no contextualizadas. Ello hace que los alumnos perciban que lo importante es recordar informaciones y no tanto aplicar lo que han aprendido a la resolución de nuevos problemas reales. No es fácil plantear una evaluación que valore si un estudiante es competente utilizando sus conocimientos de ciencia y sobre la práctica de hacer ciencia, ingeniería o ambas, y mucho menos en una prueba escrita con tiempo limitado para responderla.

En ese sentido, el programa de evaluación PISA esta siendo un buen referente, ya que las preguntas que plantea acostumbran a estar bien diseñadas para evaluar la competencia del alumnado. Asimismo, cada vez es más habitual la aplicación de nuevas metodologías de evaluación, como la exposición oral de los resultados de los proyectos a otros colectivos, la presentación de conclusiones y su argumentación a través de «congresos» de estudiantes, el diseño de aplicaciones informáticas o el análisis crítico de artículos periodísticos.

¿ESTÁ PREPARADO EL PROFESORADO PARA AFRONTAR ESTOS CAMBIOS?

El problema más difícil de resolver es seguramente el del cambio en las rutinas del profesorado y, por tanto, el de su formación. La enseñanza es una profesión muy conservadora, que tiende a ejercerse en función de cómo uno aprendió y no tanto de cómo le enseñaron a enseñar, ni de la investigación realizada en este campo. Cada docente tiene su propia visión sobre lo que debe ocurrir en el aula, y estas ideas y las prácticas asociadas son muy difíciles de cambiar.

Si bien es cierto que la investigación en didáctica de las ciencias todavía no ofrece conclusiones claras sobre cuáles son los contenidos más adecuados y la mejor forma de enseñarlos, ello no justifica que se continúen utilizando metodologías que se ha demostrado que no promueven el aprendizaje de la mayoría de los alumnos. Si ya sabemos que algo no funciona, debemos cambiarlo. Algunos estudiantes obtienen buenos resultados con cualquier metodología, pero son pocos; y si la finalidad es que el 85 por ciento de la población (objetivo de la Unión Europea) tenga un buen nivel básico de conocimientos científicos y del modo en que estos se generan, es necesario explorar nuevas vías e innovar constantemente.

Propuestas didácticas que pudieron ser válidas hace treinta años, cuando no existía Internet, la perspectiva de trabajo era ejercer la misma profesión durante toda la vida y la diversidad sociocultural del alumnado era otra, actualmente carecen de utilidad. De ahí que se hable de que ser profesor hoy exige aplicar tantos cambios en las prácticas tradicionales que, de hecho, comporta también ejercer una nueva profesión.

A MODO DE CONCLUSIÓN

A veces se dice que la didáctica no es un campo de investigación como el resto, porque el día que se haya averiguado cuál es el mejor modo de enseñar ya no quedarán más cuestiones pendientes. Sin embargo, al tratarse de una ciencia estrechamente vinculada al contexto sociocultural, en constante evolución, siempre habrá nuevas preguntas. Y estas no se podrán responder enseñando lo mismo y de la misma manera que las viejas. Quizás acabe desapareciendo el concepto tradicional de asignatura, pero —¡que no cunda el pánico!— los saberes científicos que son patrimonio de la humanidad seguirán estando ahí, aunque quizá no estarán todos los que hay ahora. En resumen, la enseñanza de las ciencias para el siglo XXI tiene un reto importante: reinventarse.

PARA SABER MÁS

Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. T. D. Sadler en *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 41, n.º 5, págs. 513-536, 2004.

Important but not for me: Students' attitudes towards secondary school science in England. E. W. Jenkins y N. W. Nelson en *Research in Science & Technological Education*, vol. 23, n.º 1, págs. 41-57, 2005.

Concept development and transfer in context-based science education. J. K. Gilbert, A. M. W. Bulte y A. Pilot en *International Journal of Science Education*, vol. 33, n.º 6, págs. 817-837, 2011.

High school student perceptions of the utility of the engineering design process: Creating opportunities to engage in engineering practices and apply math and science content. L. Berland, R. Steingut y P. Ko en *Journal of Science Education and Technology*, vol. 23, n.º 6, págs. 705-720, 2014.

La medicalización de la sociedad, un contexto para promover el desarrollo y uso de conocimientos científicos sobre el cuerpo humano. A. M. Domènech et al. en *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 33, n.º 1, págs. 101-125, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tradición e innovación. Francesc Pedró en *IyC*, diciembre de 1992.

¿Qué debe enseñarse en el bachillerato? VV.AA. en *IyC*, agosto de 1996.

Enseñanza de las ciencias. W. Wayt Gibbs y Douglas Fox en *IyC*, marzo de 2000.

Aprendiendo a aprender. Luis R. Guerra Cid y S. Jiménez Torres en *MyC* n.º 34, 2009.

Las buenas preguntas. Dennis M. Bartels en *IyC*, septiembre de 2013.



Olas des en el Ártico

AGUAS REVUELTAS: En las proximidades de la Tierra de Francisco José, al norte de Rusia, el mar abierto experimenta un oleaje más agitado de lo usual. En el pasado, la zona se encontraba cubierta por una mayor cantidad de hielo.

tructivas

Desde hace un tiempo, el Ártico está experimentando gigantescas olas que rompen el hielo. Las repercusiones climáticas y ecológicas del fenómeno podrían ser de largo alcance

Mark Harris

EN SÍNTESIS

Por razones que los científicos aún ignoran, el hielo del océano Ártico se está fundiendo con mayor rapidez de lo que predicen los modelos sobre el calentamiento global.

El fenómeno podría deberse a la aparición de olas gigantes. La fusión parcial del hielo ártico concede a las olas más espacio para aumentar su tamaño e intensidad.

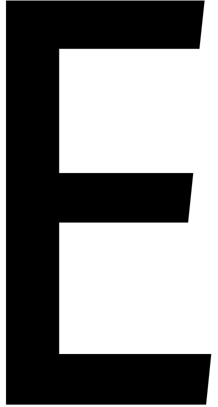
Al arremeter contra el hielo, el oleaje puede fragmentarlo. Como consecuencia, aumenta la extensión de mar abierto, lo que a su vez favorece la generación de más olas.

La reducción de la capa de hielo ártica podría influir en las condiciones meteorológicas de regiones lejanas, erosionar las costas y plantear retos geopolíticos.





Mark Harris es periodista especializado en ciencia y tecnología.



n 2014, el mar de Chukchi vivió un verano fuera de lo común. Las aguas árticas, que desde tiempos históricos permanecen congeladas durante gran parte del año, presentaban una inusual carencia de hielo. Su escasez fue tal que 35.000 morsas quedaron encalladas en la costa noroccidental de Alaska al no encontrar témpanos de hielo desde los que alimentarse. Una mañana de septiembre, a bordo del barco de investigación *Norseman II*, a cientos de kilómetros mar adentro, el oceanógrafo Jim Thomson reparó en otra peculiaridad: algunos de sus compañeros de expedición se mareaban.

Las náuseas son un percance habitual en los viajes por alta mar, pero no en la región donde convergen el mar de Chukchi y el de Beaufort. Por lo general, en esa zona no hay espacio para que pueda generarse oleaje. No obstante, la embarcación se veía sacudida por enormes olas de 4,5 metros que estallaban sobre la cubierta. El mar se hallaba tan agitado que no resultaba seguro navegar contra del oleaje, por lo que el capitán tuvo que orientar la nave a su favor. Cuando Thomson, marinero experimentado, vio a sus compañeros tambalearse con cara de estar a punto de arrojar las entrañas, se deleitó con aquella tormenta: había ido en busca de olas y ahí las tenía.

«Eran más grandes que cualquier otra ola que hubiera concebido, medido o de la que hubiera oído hablar en el Ártico», recuerda el investigador. Unos meses antes, había desplegado una pequeña flota de drones acuáticos de observación marina. Aquel día trataba de recuperar uno. «De hecho, las olas más altas registradas durante todo el año fueron las observadas seis horas antes de recobrar el robot», añade.

Esas olas gigantes tal vez permitan explicar un inquietante misterio: ¿qué está causando la rápida desaparición del hielo ártico? Los modelos climáticos, ajustados con los datos sobre el calentamiento global, predicen una tasa de deshielo más lenta que la observada. Así que, o bien los modelos fallan, o bien ocurre algo más. Thomson y otros científicos creen que la solución al problema podría guardar relación con las olas. El deshielo provocado por el cambio climático concede al oleaje más espacio donde crecer, lo que genera olas que golpean el hielo y lo fragmentan hasta hacerlo desaparecer. En 2012, cuando Thomson lanzó otras boyas robóticas similares, una enorme ola sacudió una de ellas y la levantó 7,5 metros.

Los efectos de las gigantescas olas que está experimentando la zona podrían ser de alcance planetario. Las aguas árticas circundan todo el polo: se extienden desde los mares de Beaufort y Chukchi, al norte de Canadá y Alaska, hasta los de Siberia Oriental, Kara y Barents, al norte de Rusia, desde donde prosiguen hasta las aguas de Noruega y Groenlandia, en el extremo norte del Atlántico. Dado lo vasto de la región, una alteración de su cubierta de hielo no solo influiría en el hábitat de las morsas, sino también en la trayectoria de los flujos oceánicos e incluso en la corriente en chorro atmosférica, lo que repercutiría en el clima a miles de kilómetros de distancia. Y si el hielo que protege sus bordes continentales desapareciese, el frágil permafrost, que compone gran parte de la costa, podría quedar en peligro.

Tales consecuencias fueron las que hicieron que, en 2014, Thomson y otros cien investigadores viajaran al Ártico con la red de detección remota más avanzada jamás desplegada en aguas frías. Su misión consistía en llevar a cabo un experimento de millones de dólares con el fin de averiguar las implicaciones de las olas gigantes en el futuro del océano más misterioso del planeta.

DIAGNÓSTICO POLAR

Los investigadores sabían desde hacía tiempo que algún aspecto crítico del Ártico se les estaba escapando. Por muchos números que hicieran, la fragmentación parcial anual del casquete estaba ocurriendo más rápido y con mayor alcance de lo que preveía cualquier modelo, incluso aquellos que consideraban las versiones más extremas del calentamiento global. En 2007, Julienne C. Stroeve, climatóloga del Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo de EE.UU., reparó en el fenómeno y expuso en un artículo que ninguna, o muy pocas, de las simulaciones del Ártico utilizadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) predecían el deshielo observado. Según la investigadora, aun después de ajustar los modelos, la tasa de desaparición del hielo continúa superando las predicciones: «Incluso la disminución reciente sigue estando más allá de la media de todos los modelos. Estos no detectan lo que realmente ocurre».

Disponer de modelos climáticos precisos para el Ártico reviste una importancia fundamental. Los científicos del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroccidental, en EE.UU., creen que, debido a la reducción de la banquisa ártica, el calor que en circunstancias normales quedaría atrapado bajo el hielo podría escapar hacia la atmósfera. A su vez, esa energía térmica alteraría la corriente en chorro, el intenso flujo de aire que circula de oeste a este a grandes altitudes. Algunos expertos piensan que dicha corriente actúa como una barrera que impide que el gélido aire ártico se desplace hacia el sur, por lo que sus perturbaciones podrían causar eventos meteorológicos extremos relacionados con el llamado «vórtice polar», como los que han azotado algunas ciudades de la costa este de EE.UU. en los últimos dos inviernos [*véase* «El comportamiento anómalo de la corriente en chorro», por Jeff Masters; Investigación y Ciencia, febrero de 2015].

Los investigadores del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, en Massachusetts, han observado que el volumen de agua dulce en el mar de Beaufort ha aumentado a medida que la capa de hielo adelgazaba y disminuía de tamaño. En la actualidad, hay en la zona un 25 por ciento más de agua dulce que hace

PÁGINAS ANTERIORES: ANDY MANN, *NATIONAL GEOGRAPHIC*



MAR SIN OLAS: Cuando el mar de Beaufort queda cubierto por una densa capa de hielo, sus aguas se mantienen en calma. Los barcos, como este buque guardacostas de EE.UU., avanzan con dificultad.

40 años. Si dicha capa de agua dulce penetrara en el Atlántico Norte, las corrientes oceánicas podrían verse alteradas de manera significativa. Algo similar ocurrió en los años setenta del pasado siglo, si bien las razones aún se desconocen: la capa vertió hielo ártico hacia el sur, lo que alteró las corrientes que, de ordinario, mantienen el balance térmico de la región. Algunos científicos consideran que perturbaciones similares ya han causado cambios climáticos extremadamente rápidos en el pasado, como durante el evento que, hace unos 12.000 años, hizo que la temperatura del casquete de Groenlandia se elevase unos ocho grados Celsius en apenas unas décadas.

La desaparición del hielo también está acelerando la actual erosión costera del Ártico. Los litorales de permafrost, donde el agua permanentemente congelada del subsuelo entra en contacto con el mar abierto, representan un tercio de la línea costera del planeta. «El hielo es lo único que mantiene cohesionadas esas costas, las cuales pueden erosionarse con rapidez si la banquisa no las protege», comenta Hugues Lantuit, geomorfólogo del Instituto Alfred Wegener, un centro alemán dedicado a la investigación polar. Algunas de las zonas costeras que bordean el mar de Beaufort ya presentan tasas de retroceso de hasta 30 metros al año.

Esa erosión puede acabar con asentamientos humanos, devastar ecosistemas, causar la subsidencia del terreno y aumentar la acidificación del océano y el calentamiento global. La fusión progresiva del permafrost libera el carbono de las plantas, animales y microorganismos que hasta entonces habían permanecido congelados en su interior. Esa materia orgánica termina descomponiéndose y convirtiéndose en fuente de dióxido de carbono y metano, gases de efecto invernadero que, además, pueden acidificar el océano y dañar la vida marina.

A las grandes empresas también les interesa conocer con mayor precisión lo que está sucediendo con el hielo. Las compañías de petróleo y gas divisan nuevas oportunidades para perforar en aguas anteriormente congeladas. Por otro lado, si pudiera predecirse con exactitud la cantidad de deshielo estacional, las compañías navieras podrían usar el legendario paso del Noroeste y acortar en una semana la duración de los viajes del Pacífico al Atlántico. La desaparición del hielo también ha llamado la atención de la Marina de EE.UU.; sobre todo, por las implicaciones que tendría en materia de seguridad la aparición de un nuevo océano abierto en el extremo norte del país. En resumen, existe un buen número de razones para esclarecer por qué el hielo ha estado desapareciendo.

Thomson sospecha que, dada su capacidad para destruir el hielo, las grandes olas podrían explicar la razón por la que las predicciones no han coincidido con la realidad. «Hasta ahora, el oleaje no se ha integrado en ningún modelo que incluya el océano, la atmósfera, la meteorología y la banquisa», señala el investigador. «Sencillamente, falta el proceso mecánico.» Por su parte, Lantuit opina que, aunque las repercusiones del oleaje aún no se comprendan del todo, sí que podrían explicar las variaciones de sus mapas. «Todavía no existe un buen modelo que describa los efectos de las olas en las costas de permafrost. Pero por regla general, a mayor tamaño de las olas, cabe esperar una mayor erosión», apunta este experto en costas.

CAZADORES DE OLAS

Aunque hasta ahora las olas no se hayan incluido en los modelos, los científicos conocen desde hace tiempo los efectos que un mar agresivo puede causar incluso en el hielo más tenaz. Elizabeth Hunke elabora modelos oceánicos y del hielo marino para el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en EE.UU. En una expedición realizada en 1998 a la Antártida, se encontró con una zona de aguas inusualmente abiertas en las proximidades de la barrera de hielo de Filchner-Ronne, en el mar de Weddell: «Vi las olas arremeter contra un hielo que lleva-

ANÁLISIS DE LA ZONA DE DESHIELO: En 2014, los científicos desplegaron una red de sensores al noreste de Alaska para dilucidar por qué la banquisa estaba desapareciendo más rápido de lo previsto. En buena parte, la respuesta podría hallarse en la formación de grandes olas que destruyen el hielo.

EFECTO SOBRE EL HIELO

Círculo vicioso

Las olas se forman debido a que el viento tiende a «apilar» el agua en la dirección en la que sopla. Eso no sucede en un Ártico congelado, ya que el agua se encuentra bajo el hielo (*1*). No obstante, cuando la temperatura aumenta y parte del hielo se derrite, aparece una zona de agua abierta que el viento puede empujar (*2*). Las olas resultantes chocan contra el resto del hielo y lo fragmentan, lo que incrementa la extensión de agua abierta y, con ello, genera olas aún mayores (*3*).

Viento

1

2

3

Vehículo subacuático

Boya detectora de olas

Rastreador de olas superficiales

Sensor de olas y corrientes

Sensor de masa de hielo

En 2014, con el objetivo de estudiar la interacción entre el hielo y las olas, los científicos desplegaron los instrumentos que se muestran aquí: boyas y rastreadores para medir las dimensiones de las olas, robots acuáticos para observar la evolución de la cubierta de hielo y sensores para calcular su espesor.

BRYAN CHRISTIE

ba fijado en la orilla años, décadas o incluso siglos», recuerda Hunke. «Por mucho que el hielo fuera realmente grueso y duro de romper, las olas no cejaban.»

Sin embargo, dado que nadie previó la aparición de olas gigantescas en el Ártico, los expertos no pensaron nunca en estudiarlas ni en introducirlas en los cálculos. Pero, en 2012, los llamativos datos registrados por la boya de Thomson dieron la vuelta al asunto. Sus resultados no solo despertaron el interés de los oceanógrafos, sino también el de la Oficina de Investigación Naval de EE.UU., la cual ya había decidido invertir 12 millones de dólares en averiguar qué ocurría con el hielo ártico por medio de un proyecto llamado Programa para la Zona de Hielo Marginal. En el verano de 2014, la caza de olas se integró de manera oficial en la investigación.

El proyecto reunió a más de un centenar de científicos de distintos países para que llevasen a cabo el experimento más ambicioso realizado hasta la fecha a fin de observar la fragmentación estacional de la capa de hielo ártica. Hace años, el mismo objetivo habría requerido emplear rompehielos que surcaran la superficie del océano, submarinos que deambularan en sus profundidades y satélites que sobrevolaran el área. En 2014, sin embargo, se usaron barcos pequeños, expediciones cortas y un gran número de drones. En la actualidad, los robots autónomos no solo consiguen acceder a lugares con los que el ser humano solo podría soñar, sino que están capacitados para tomar datos las 24 horas del día.

En la primavera de 2014, los expertos llegaron a la espesa capa de hielo del mar de Beaufort e instalaron decenas de instrumentos a lo largo de una línea de 400 kilómetros que, desde una latitud de unos 73 grados norte, se prolongaba hacia el polo. Los dispositivos midieron el grosor del hielo, la temperatura y la composición del agua subyacente y las condiciones meteorológicas. Los aparatos podían flotar, por lo que, a medida que el hielo fue rompiéndose gradualmente durante el verano, los instrumentos que acababan en las frías aguas podían continuar registrando datos hídricos y meteorológicos.

En julio del año pasado, a bordo del *Ukpik*, un pequeño barco pesquero reconvertido en navío de investigación, Thomson y otros cinco colaboradores comenzaron a desplegar en el mar de Beaufort una serie de robots más avanzados. En aquel momento, a 160 kilómetros de la población más cercana, los científicos probablemente fuesen los marineros más septentrionales del planeta. Los investigadores suplieron la falta de compañía humana con la de robots de distintos tipos. Unos eran las boyas estándar de Thomson, detectoras de olas. Los otros, mucho más complejos, planeadores submarinos Seaglider: vehículos autónomos con forma de torpedo y casi dos metros de longitud que se autopropulsan a través del agua. Provistos de dos aletas ajustables para maniobrar, cada uno posee una cámara hinchable que, al inflarse o desinflarse, hace que el robot ascienda o se hunda. Pueden recorrer hasta unos 20 kilómetros diarios, dibujando largas trayectorias arqueadas de ascenso y descenso.

Una potente batería mantiene a los Seagliders en funcionamiento durante diez meses. Cada vez que uno de ellos alcanza el punto más alto de su trayectoria, asoma brevemente entre las olas, como una foca curiosa, lo que le permite obtener su locali-

zación por medio de GPS, transmitir datos a los satélites y recibir nuevas instrucciones. En total, se lanzaron cuatro Seagliders, los cuales pasaron dos meses yendo y viniendo entre el mar abierto y el casquete de hielo, midiendo la turbulencia, temperatura, salinidad y contenido en materia orgánica del agua.

Cuando se encontraban bajo el hielo durante largos períodos de tiempo, los aparatos permanecían desconectados de los satélites. Por ello, los investigadores emplearon Wave Gliders, un tercer tipo de vehículos autónomos que avanzan por la superficie del agua. Alimentados por paneles solares y por el movimiento de las olas, estos instrumentos enviaban señales acústicas a los vehículos submarinos desde el borde de la capa de deshielo. Lee Freitag, ingeniero de Woods Hole, diseñó un sistema para enviar ondas de baja frecuencia a los Seagliders que explotaba el hecho de que las capas reflectoras subacuáticas permiten transmitir sonidos a muy larga distancia. (Generadas por las variaciones de densidad del agua, este tipo de capas son las mismas que hacen que el canto de las ballenas pueda recorrer miles de kilómetros. Los expertos escogieron capas y frecuencias distintas de las empleadas por los cetáceos locales para evitar interferir con ellos.) Las señales transmitían a los Seagliders los datos de latitud y longitud, así como las instrucciones de los investigadores.

Semejante despliegue robótico presenta varias ventajas con respecto a una travesía a bordo de un rompehielos. En primer lugar, los robots permiten abarcar un área muy extensa. Los rompehielos se ven limitados a una sola trayectoria y, a menudo, se encuentran a cientos de kilómetros del fenómeno que más conviene estudiar en cada momento. Los modernos vehículos autónomos, sin embargo, pueden virar con rapidez y observar cómo se retuerce el hielo a medida que sucumbe en el mar. Pero, además, para controlar los robots basta con un pequeño barco nodriza, como el *Ukpik*. «Un rompehielos tradicional es como un elefante en una cacharrería; destruye las olas que justamente queremos medir», explica Thomson.

Un día, apoyado contra la barandilla del *Ukpik* tras haber ayudado a la tripulación a bajar al agua un par de Wave Gliders, Thomson explicó el proceso de formación de olas: «Para generarlas hace falta viento. Una vez lo hay, se necesitan dos elementos más: tiempo y distancia. Cuanto mayor sea el espacio disponible, más altas serán las olas. El mismo efecto se produce durante una tormenta. Las olas realmente grandes surgen cuando se combinan ambos factores».

En primavera, incluso en los años más cálidos, la mayor parte del Ártico se encuentra cubierta de hielo. Al final del verano, la superficie de agua sin hielo equivale a dos veces la del mar Mediterráneo. Cuanta más agua líquida quede expuesta al viento, mayores serán las olas generadas. El viento empuja el agua que tiene delante, por lo que un mayor espacio libre de hielo permite que las olas se acumulen. Pero, además, el mar absorbe más calor procedente del sol en ausencia de hielo (ya que este refleja la luz solar). Un agua más cálida eleva la temperatura del aire, lo que a su vez puede generar vientos más intensos. Si concurren las condiciones adecuadas, todos esos factores pueden llegar a romper áreas de hielo del tamaño de un país en cuestión de días. Y, por supuesto, eso incrementa aún más la superficie de mar abierto, en lo que supone un círculo vicioso en el que las grandes olas se generan cada vez con más facilidad.

Lo que los expertos aún ignoran es, por un lado, cuánto influye cada factor de ese bucle en la fragmentación del hielo, y, por otro, si las olas pueden causar que el hielo tarde más en volver a formarse al llegar el otoño. Las respuestas requerirán entender mejor la interacción entre las olas y el hielo marino.

HIELO ROTO

Tras dejar los drones en julio, el *Ukpik* se encontró con una gran masa de hielo formada por bloques muy distintos, desde pequeños fragmentos hasta enormes montañas. Se trataba del escenario perfecto para la caza de olas, por lo que Thomson se dispuso a preparar una boya. El barco se detuvo fuera de la zona helada para que el investigador pudiera lanzarla por la borda y, después, se adentró con cautela para soltar otra.

La diferencia entre el mar abierto y la región con hielo se hacía patente a medida que el barco avanzaba. Fuera, el agua estaba revuelta. Pero en cuanto el *Ukpik* alcanzó los primeros fragmentos de hielo, el mar se calmó y el oleaje se tornó suave y de escasa altura. Después, tras adentrarse lentamente centenares de metros y bordear bloques mayores, todo quedó reducido a una débil vibración en las aguas cristalinas. «El hielo filtra las olas, de forma que solo las más largas pueden penetrar», explicaba Thomson entusiasmado. Uno de los aspectos que pretendía estudiar era qué proporción de ese filtraje se debía a la dispersión y cuál al amortiguamiento.

La dispersión implica que el hielo simplemente desvía la energía de las olas sin absorberla, al igual que un prisma que dispersa la luz. Sin embargo, el amortiguamiento supondría que las olas transmiten energía al hielo y que, en consecuencia, este se mueve y se rompe. Por tanto, este segundo efecto provocaría mayores daños en la masa de hielo. En cuanto a las gigantescas olas generadas en aguas abiertas, las medidas a escala centimétrica realizadas en la zona podrían contribuir a mejorar los modelos del Ártico en los próximos años.

Según W. Erick Rogers, oceanógrafo del Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU., los hallazgos logrados hasta el momento por Thomson hacen más verosímil la existencia de un ciclo en el que el aumento del oleaje causa la merma del hielo, y la merma de hielo aviva aún más oleaje. «Este mecanismo de retroalimentación parece importante para entender la futura extensión que ocuparán el agua y el hielo terrestres en el futuro, con un clima más cálido», comenta el investigador.

Mientras el *Ukpik* abandonaba la zona de hielo flotante y ponía rumbo de regreso al puerto, se aproximó a él una pequeña embarcación pilotada por un pescador inuit y su nieto que ofrecieron a la tripulación pescado fresco para cenar: tres rollizas truchas árticas. El hielo del Ártico ha comenzado a despertar la atención del resto del mundo, pero son estas comunidades (y la fauna de la zona, como los osos polares, las focas, las ballenas y los microorganismos enterrados en el permafrost) las que ya han comenzado a experimentar los efectos de una capa de hielo menguante y unas olas cada vez mayores.

PARA SABER MÁS

Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. Julienne C. Stroeve et al. en *Geophysical Research Letters*, vol. 39, art. n.º L16502, agosto de 2012.
Swell and sea in the emerging Arctic ocean. Jim Thomson y W. Erick Rogers en *Geophysical Research Letters*, vol. 41, n.º 9, págs. 3136-3140, mayo de 2014.
Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. Judah Cohen et al. en *Nature Geoscience*, vol. 7, n.º 9, págs. 627-637, septiembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Calentamiento global: ¿Más rápido de lo previsto? John Carey en *IyC*, enero de 2013.
Inviernos extremos. Charles H. Greene en *IyC*, febrero de 2013.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

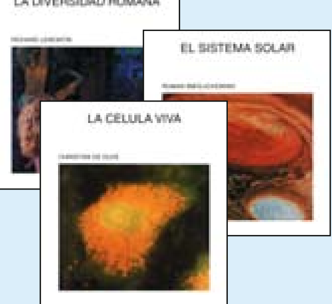
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética

(*) Disponible solo en formato digital



TEMAS 80
Número especial 20º aniversario
GRANDES IDEAS DE LA FÍSICA



Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación





por José David Flores Félix, Encarnación Velázquez Pérez y Raúl Rivas González

Fertilizantes de origen bacteriano

La aplicación de ciertas bacterias al suelo aumenta la productividad de los cultivos de forma sostenible

Los consumidores exigen, cada vez más, alimentos que posean la máxima seguridad desde el punto de vista sanitario y que se hayan producido sin utilizar ningún, o casi ningún, tipo de compuesto que pueda resultar nocivo, como ciertos plaguicidas. También aumenta la concienciación sobre las repercusiones ambientales de la aplicación excesiva de abonos inorgánicos, que en última instancia van a parar a los ríos y al mar, donde pueden provocar floraciones algales tóxicas.

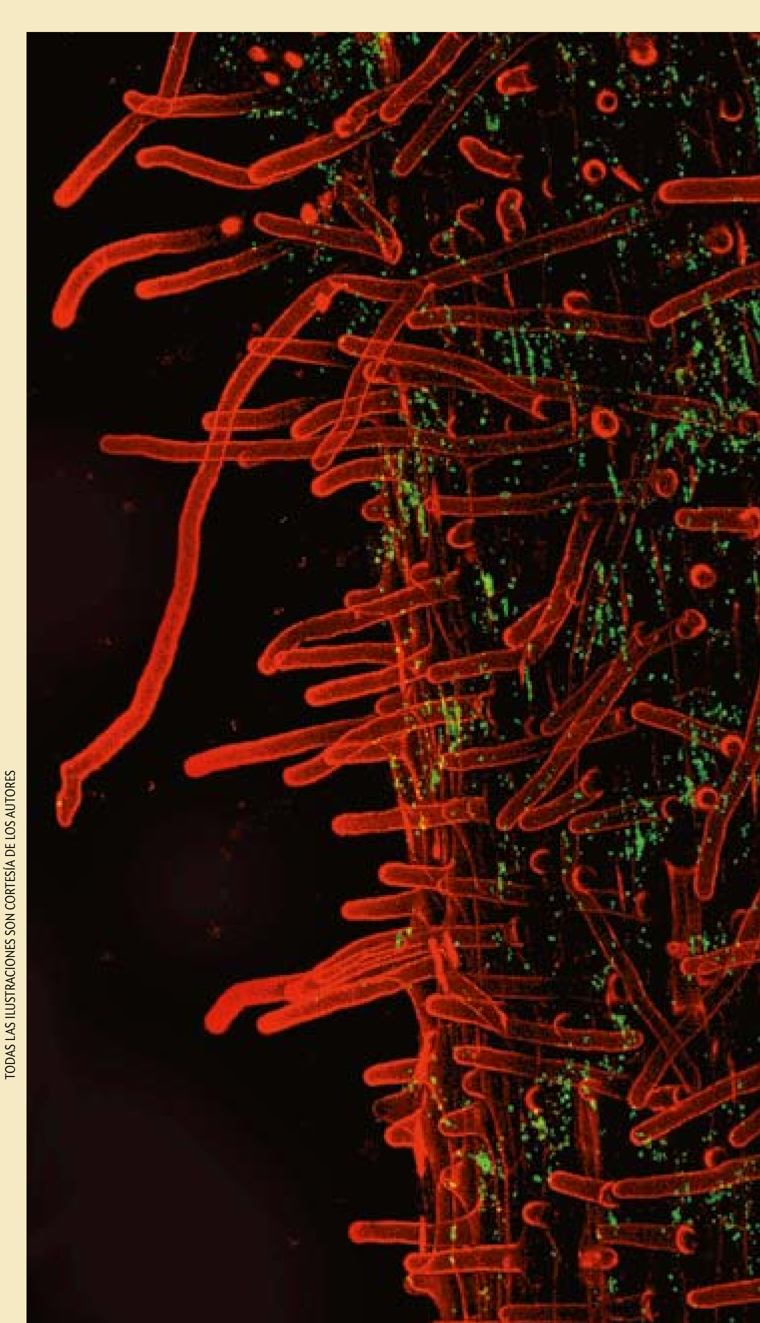
De ahí que la disminución de los abonos sintéticos y su sustitución por otro tipo de fertilización se haya convertido en un objetivo principal en el ámbito de la gestión agrícola. Así, diversas normativas europeas han contemplado la incorporación de microorganismos en los cultivos para que funcionen como biofertilizantes. Dentro de estos se incluyen diversas bacterias que promueven el desarrollo de las plantas de forma directa al movilizar los nutrientes del suelo y volverlos disponibles para los vegetales. También lo hacen de forma indirecta, al producir fitohormonas que aumentan el crecimiento, estimular mecanismos de defensa de la planta frente a posibles ataques de animales y mantener a raya los patógenos microbianos [*véase* «Tierra prodigiosa», por Richard Conniff; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013].

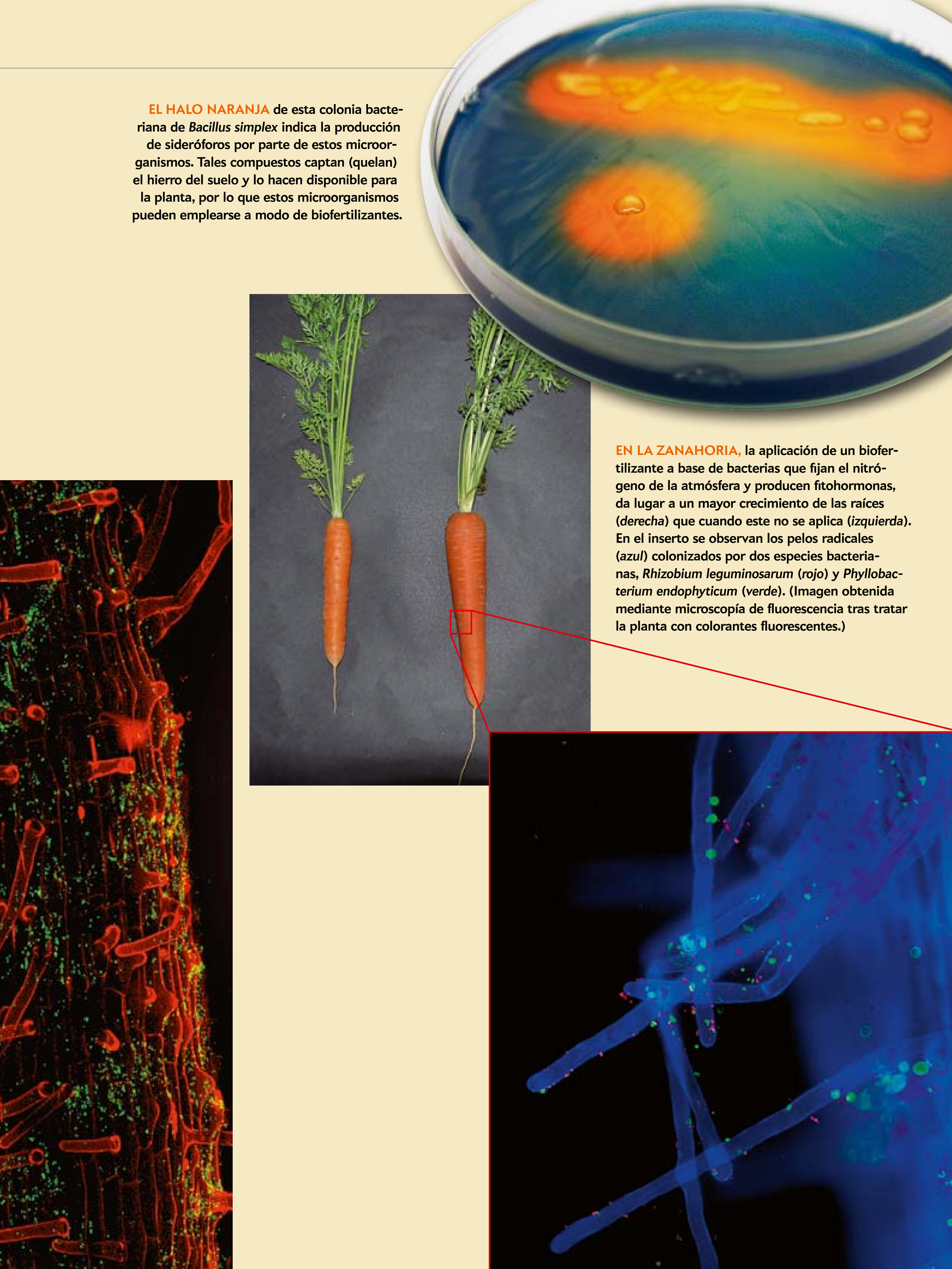
El género *Rhizobium* y otras bacterias afines son algunos de los biofertilizantes más conocidos. Forman nódulos en las raíces de la planta y establecen con ella una relación simbiótica al suministrarle el nitrógeno que fijan de la atmósfera. Estos microorganismos han sido utilizados como inoculantes de leguminosas durante décadas y han demostrando la mejora de la productividad y una alta seguridad para la salud humana y animal.

En nuestro laboratorio estamos aplicando con éxito estas bacterias a diversos cultivos, entre ellos varios cereales, como el arroz o el maíz, y diversas hortalizas, como la lechuga, el tomate, la espinaca o la zanahoria. Hemos comprobado que tienen una gran capacidad para interaccionar con las plantas y mejorar su producción. Nuestros hallazgos apoyan, por tanto, el empleo de los microorganismos como biofertilizantes.

—José David Flores Félix,
Encarnación Velázquez Pérez
y Raúl Rivas González
Dpto. microbiología y genética
Universidad de Salamanca

ESTA RAÍZ DE LECHUGA, con abundantes pelos radicales (*rojo*), se halla colonizada por la bacteria *Rhizobium leguminosarum* (*verde*) promotora del crecimiento vegetal. (Imagen obtenida mediante microscopía confocal de fluorescencia tras tratar la planta con colorantes fluorescentes.)





EL HALO NARANJA de esta colonia bacteriana de *Bacillus simplex* indica la producción de sideróforos por parte de estos microorganismos. Tales compuestos captan (quelan) el hierro del suelo y lo hacen disponible para la planta, por lo que estos microorganismos pueden emplearse a modo de biofertilizantes.

EN LA ZANAHORIA, la aplicación de un biofertilizante a base de bacterias que fijan el nitrógeno de la atmósfera y producen fitohormonas, da lugar a un mayor crecimiento de las raíces (*derecha*) que cuando este no se aplica (*izquierda*). En el inserto se observan los pelos radicales (*azul*) colonizados por dos especies bacterianas, *Rhizobium leguminosarum* (*rojo*) y *Phyllobacterium endophyticum* (*verde*). (Imagen obtenida mediante microscopía de fluorescencia tras tratar la planta con colorantes fluorescentes.)

por Stéphane Schmitt

Stéphane Schmitt es investigador del laboratorio SPHERE, dedicado a las ciencias, la filosofía y la historia, en la Universidad París-Diderot.



Los animales como colonias de organismos

Ciertos naturalistas del siglo XIX consideraron que la mayoría de los animales estaban formados por organismos más pequeños, a imagen de los corales o las salpas. Esta teoría colonial ha pervivido hasta hoy

Corales, esponjas, ascidias... Numerosos organismos animales pertenecientes a diversos grupos acuáticos presentan una organización singular. Viven en colonias basadas en un mismo principio: un primer individuo se multiplica asexualmente y los individuos resultantes se asocian unos a otros, formando un superorganismo que puede alcanzar una talla considerable.

En algunas especies, como los pólipos de coral, todos los individuos son idénticos y perfectamente discernibles. En otras, como los sifonóforos de zooplancton, los individuos se especializan: unos se ocupan de la reproducción sexual, otros de la nutrición, etcétera. La colonia puede llegar a adoptar el aspecto de organismo único, cuyos «órganos» estarían formados por individuos que apenas se distinguen los unos de los otros.

Los naturalistas descubrieron en las primeras décadas del siglo XIX que algunos animales «inferiores», como las salpas o las ascidias (animales marinos), presentaban esta particularidad. A continuación se preguntaron si este tipo de organización podría ser universal, de modo que también los organismos «superiores» serían colonias de organismos elementales especializados hasta el extremo de ser irreconocibles.

Animales compuestos de animales

La teoría colonial es una más de las teorías propuestas entonces para explicar el origen de las formas animales. A diferencia de las otras, sin embargo, ha sobrevivido a los sucesivos cambios en las ciencias de la vida, como el que supuso la teoría de la evolución. Esta capacidad de adaptación la ha reforzado y explica que haya llegado a nuestros días.

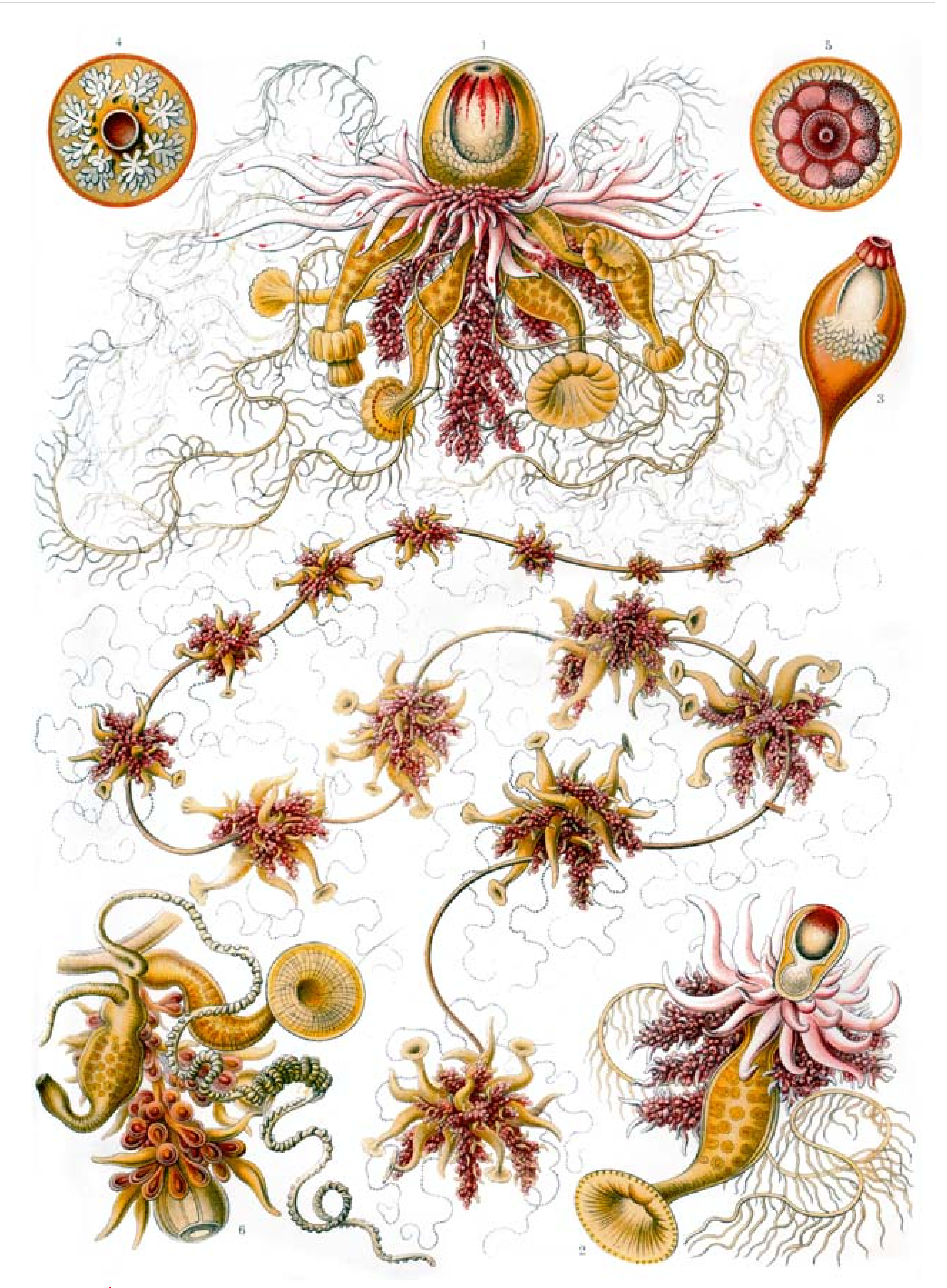
En 1830, dos eminentes científicos franceses, Georges Cuvier y Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, entablaron una célebre controversia que trascendió la comunidad científica. Los historiadores, en particular el estadounidense Toby Appel en los años ochenta del siglo XX, han revelado las profundas fracturas políticas y sociales subyacentes al debate. La cuestión científica fundamental tenía por objeto el reino animal. ¿Cómo entender la diversidad de sus niveles de organización, es decir, la disposición relativa de los elementos que constituyen los organismos?

Geoffroy creía que los distintos grupos de animales estaban vinculados a un único tipo general, válido tanto para los insectos y los moluscos como para los vertebrados. Cuvier, en cambio, consideraba que había varios niveles de organización irreducibles, y que la anatomía de los vertebrados, por ejemplo, era radicalmente distinta de la de un artrópodo. La Revolución de 1830 extinguió la disputa sin que se hubiera declarado un vencedor, y Cuvier murió dos años después. Pero la cuestión quedó en pie y no dejó de suscitar todo tipo de reflexiones sobre la morfología de los seres vivos.

Esas reflexiones fueron estimuladas, entre 1820 y 1830, por el descubrimiento de la organización colonial de organismos como los sifonóforos, estudiados por el viajero y naturalista francés Charles-Alexandre Lesueur, o las salpas, por el escritor alemán Adelbert von Chamisso. Ambos cuestionaban la noción de individuo en el mundo animal.

ESTA COLONIA DE SIFONÓFOROS ***Forskalia edwardsi*** **(*centro*), representada por Ernst Haeckel, parece un único animal. Pero está formada por distintos organismos que no sobrevivirían independientemente.**

FUENTE: KUNSTFORMEN DER NATUR, ERNST HAECKEL, 1904/WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO



FUENTE: KUNSTFORMEN DER NATUR, ERNST HAECKEL, 1904/WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO

LOS SIFONÓFOROS, como los de esta imagen de 1904 del naturalista alemán Ernst Haeckel, son colonias de miles de individuos especializados en tareas como la caza, la digestión o la defensa. ¿Son superorganismos?

En 1827, el médico y naturalista francés Alfred Moquin-Tandon publicó una *Monografía de la familia de los hirudíneos*. Su punto de partida eran las repeticiones en la organización de la sanguijuela, no solo en su morfología externa segmentada, sino también en su anatomía interna. Moquin-Tandon propuso que no se trataba de un organismo simple, sino de «un animal compuesto de cierto número de animales». Para designar a los animales elementales que formaban los segmentos de la sanguijuela, introdujo el concepto de «zoonito». En los animales segmentados coexistirían «dos tipos de vida», las «vidas particulares» de los zoonitos y la «vida general» del conjunto.

El médico Antoine-Louis Dugès, colega de Moquin-Tandon en Montpellier, hizo de ese concepto la piedra clave de una teoría sobre la organización de los animales, publicada en 1832 como *Memoria sobre la conformidad orgánica en la escala animal*. Todo animal estaría compuesto de organismos más pequeños, los zoonitos, que formarían los principales órganos vitales. Las especies más simples, como las ascidias no coloniales, constan de un solo zoonito. Los animales más complejos, como los artrópodos o los vertebrados, comprenden un número más o menos grande de ellos, acoplados unos a otros y especializados en ciertas funciones. Esta organización plural es fácilmente reconocible en los artrópodos, los anélidos y otros grupos. No así en los más elaborados, especialmente los vertebrados, en los cuales apenas es discernible y la asociación es tan perfecta que solo pequeños indicios, como la repetición de las costillas y las vértebras, revela la existencia primordial de zoonitos.

Dugès intentó conciliar mediante su teoría de la conformidad orgánica las ideas de Geoffroy Saint-Hilaire y las de Cuvier. Del primero tomó la idea de que hay una constante en la organización de todos los animales. Del segundo, la imposibilidad de comparar, por ejemplo, la anatomía íntegra de un molusco, un insecto y un vertebrado, dado que la unidad morfológica de los animales se manifiesta solo a la escala de sus zoonitos constituyentes. En ciertos grupos, como los vertebrados, los zoonitos se disponen en fila; en otros, como las anémonas de mar, en círculo; y también pueden disponerse irregularmente. Los distintos tipos pueden combinarse de modo que el mismo animal pase por varios de ellos a lo largo de su desarrollo.

La evolución refuerza la teoría colonial

A partir de finales del siglo XVIII aparecen en Europa diversas teorías transformistas. Si hasta entonces se admitía que las especies habían permanecido inmutables desde la creación del mundo, los naturalistas avanzan ahora la hipótesis de una transformación gradual de las formas de vida. En 1809, Jean-Baptiste Lamarck propone en su *Filosofía zoológica* una teoría que explica la complejidad y diversidad de la vida a partir de tales transformaciones.

Las ideas de Dugès no guardan relación con las teorías transformistas. El proceso de coalescencia de los zoonitos no resulta de su eventual evolución, ni es producto de una historia: se trata de una organización ideal de los animales. Sin embargo, décadas después, la concepción colonial de la morfología animal se adaptará sin dificultad al transformismo triunfante.

Tras la publicación en 1859 de *El origen de las especies* de Darwin, la teoría de la evolución progresa rápidamente en círculos científicos. En quince años, la mayoría de los biólogos acepta la evolución de las especies, pese a que algunos elementos de la teoría, en particular la selección natural, no generan pleno consenso.

Ese contexto favorece la reinterpretación de conceptos originalmente ajenos al transformismo. Es el caso del tipo común (la idea de Geoffroy Saint-Hilaire según la cual todos los animales poseen una estructura básica común) o las homologías (cada parte de un insecto se corresponde con una parte de un vertebrado). La noción del tipo común adquiere realidad física. Deja de ser una idealización para convertirse en el ancestro común a todos los animales, que han heredado de él una organización general única.

La evolución dota de nuevo sentido a la teoría de Dugès. Abre la posibilidad real de que se haya dado, en el curso de la historia de la vida, un proceso de agregación en colonia de organismos elementales. A finales del siglo XIX varios científicos proponen teorías coloniales. Uno de los más prestigiosos es el zoólogo francés Edmond Perrier, profesor del Museo Nacional de Historia Natural, quien reconstruye la filogenia animal de acuerdo a este principio. En *Las colonias animales y la formación de los organismos* (1881), explica que los animales están formados por unidades microscópicas, los «plástidos» (*plastides*), que se corresponden aproximadamente con las células. Estos se organizan en unidades de orden superior, las «méridas» (*mérides*), que vendrían a ser los zoonitos de Dugès. Las méridas son, pues, «asociaciones de plástidos» diferenciados y especializados en una tarea particular.

Los animales más simples constan de una sola mérida, que no puede exceder cierta talla. Cuan-

EL MÉDICO ALFRED MOQUIN-TANDON propuso en 1827 que cada segmento de una sanguijuela era un animal.

FUENTE: *MONOGRAFÍA DE LA FAMILIA DE LOS HIRUDÍNEOS*, ALFRED MOQUIN-TANDON, EDICIÓN DE 1846/BIU SANTÉ, PARÍS

DEL GUSANO A LA DIVISIÓN DEL TRABAJO

El auge de la teoría colonial a partir de los años treinta del siglo XIX está íntimamente relacionado con el desarrollo simultáneo de las ciencias sociales. Muchos naturalistas establecen un paralelismo entre las sociedades y los organismos vivos, concebidos como asociaciones de elementos simples.

El zoólogo francés Henri Milne-Edwards basa su concepción del organismo animal en la «ley de la división del trabajo». Compara el organismo a una fábrica y sus órganos a los obreros. Cada uno de ellos desempeña eficazmente una función precisa porque no tiene que preocuparse por otras labores. «El principio que sigue la naturaleza para perfeccionar los seres es el mismo que han concebido los economistas modernos; tanto las obras naturales como las artificiales muestran las ventajas inmensas de la división del trabajo». Es evidente la influencia de las grandes teorías económicas de la revolución industrial, en particular la de Adam Smith.

Esas relaciones se estrechan a partir de 1859 con la difusión del transformismo. La analogía entre las sociedades humanas y las colonias animales está muy presente en el discurso de Edmond Perrier, con su terminología metafórica. Describe los zoonitos especializados de una colonia como «funcionarios» que dependen del resto de integrantes para su subsistencia, pero «cuya utilidad para la colonia es de primer orden, porque son los instrumentos que posibilitan su desarrollo y garantizan su victoria en la lucha por la vida».

Perrier afirma que las colonias de plástidos o de méridas no pueden exceder cierta talla y que aquellas que pueden desarrollarse «tienen ventaja sobre las otras, porque distribuyen el riesgo entre un gran número de individuos, y no uno solo». Es sorprendente la analogía con discursos contemporáneos sobre la expansión colonial de las naciones europeas, considerada una válvula de escape a los excedentes de población y una alternativa al control de la natalidad propugnado por Malthus.

Los sociólogos recurren, viceversa, a la metáfora biológica. Herbert Spencer compara la coalescencia de los segmentos de crustáceos a la fusión de los reinos anglosajones en la Edad Media. La obra de Émile Durkheim *Sobre la división del trabajo social* (1893) establece un paralelismo entre el grado de complejidad de las sociedades humanas y el de los organismos. Del mismo modo que la segmentación de los animales inferiores (los gusanos), donde cada segmento es capaz de asumir todas las funciones, ha evolucionado hacia una diferenciación creciente de los segmentos en los animales superiores, las sociedades pasan, en el curso de la historia, de un estadio primitivo en que cada individuo es polivalente a un estado avanzado que se caracteriza por la división del trabajo y la «solidaridad orgánica».

do, a través del desarrollo embrionario o de la evolución, aumentan las dimensiones y la complejidad de los animales, las méridas se dividen por gemación. Esta división puede acabar produciendo méridas independientes, o bien colonias de méridas que Perrier denominó «zoides» (*zoïdes*).

Las méridas que forman un zoide pueden estar poco diferenciadas, como en los gusanos de tierra, cuyos segmentos son similares y reconocibles, pero también muy diferenciadas y especializadas. Se disponen de un modo distinto en cada especie: ramificada, radial, linealmente... La mayoría de los animales superiores, sobre todo los vertebrados, son ejemplos de colonias lineales cuyas méridas están tan bien asociadas y diferenciadas que el origen colonial del cuerpo no es evidente sino en la repetición de estructuras como las vértebras, las costillas o los nervios craneales y raquídeos. En ciertos grupos (como los briozoos), el mismo proceso de división y especialización conduce a la formación de colonias de zoides, que Perrier llama «demos» (*dèmes*).

Perrier reconoce la similitud entre su teoría colonial y la de Dugès en una obra de historia de la ciencia, *La filosofía zoológica antes de Darwin* (1884). Las dos diferencias principales son, por un lado, la mayor complejidad de los niveles de organización de Perrier (de los plástidos a los demos); por otro, la introducción de la dimensión filogenética. La referencia a la evolución, esencial en la biología posdarwiniana, no ha eliminado las concepciones anteriores, sino que las ha renovado al proporcionarles un marco explicativo concreto. El caso de la teoría colonial muestra una de las grandes tendencias de las ciencias de la vida a finales del siglo XIX. La idea de evolución es ampliamente aceptada, no así la de selección natural, que implica el carácter aleatorio y no teleológico de la evolución. En la historia filogenética de Perrier, la evolución implica necesariamente un incremento de la complejidad y la adquisición progresiva de niveles de organización cada vez más elaborados, como ocurre en la evolución de las sociedades humanas.

Esa concepción lamarckiana de la evolución no solo es la preferida por los biólogos franceses que, como Perrier, se proclaman herederos de Lamarck, sino también por biólogos darwinistas como el alemán Ernst Haeckel, cuyas concepciones tienen mucho en común con las de Perrier.

A partir de 1900, la teoría colonial empieza a declinar, como la mayoría de las propuestas que intentaban explicar el origen de las formas animales. La aparición de nuevos enfoques y disciplinas, en particular la genética y después la biología molecular, relega a un segundo plano la morfología tradicional.

Pero no desaparece del todo y cuenta con partidarios a lo largo del siglo XX. A partir de 1980, el auge de la biología del desarrollo renueva el interés por la filogenia y la morfología. Thurston Lacalli, de la Universidad de Saskatchewan en Canadá, propone en una serie de artículos publicados a partir de 1997 una teoría colonial del origen de los vertebrados. La estructura segmentada de sus embriones sería homóloga a la de ciertas colonias lineales de tunicados, como las salpas. La incansable idea de Dugès no deja de adaptarse a nuevos contextos científicos.

PARA SABER MÁS

The Cuvier-Geoffroy debate. French biology in the decades before Darwin. T. A. Appel. Oxford University Press, 1987.
The natural sciences and the social sciences: Some critical and historical perspectives. Dirigido por I. B. Cohen. Kluwer, 1994.
Histoire d'une question anatomique: La répétition des parties. S. Schmitt. MNHN, 2004.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué es un organismo individual? Arantza Etxeberría en *IyC*, mayo de 2013.

por Rana Dajani

Rana Dajani es profesora asociada de biología molecular en la Universidad jordana Hashemite, de Zarga, e investigadora visitante del Instituto Faraday de la Universidad de Cambridge.



El reto de enseñar evolución a estudiantes musulmanes

Una oportunidad para fomentar el pensamiento crítico y libre

El rechazo de las sociedades musulmanas hacia determinadas ideas científicas como la teoría de la evolución ofrece una excelente oportunidad pedagógica. Así lo he comprobado en las clases sobre evolución que imparto en una universidad jordana.

Al principio, casi todos los estudiantes se muestran contrarios a la idea. Aun así, la mayoría están dispuestos a debatirla y al terminar el curso suelen aceptarla. Si estos jóvenes pueden cuestionar un tema académico tan controvertido, también podrán poner en duda otros aspectos de su vida. Una actitud crucial para su desarrollo personal y para convertirse en ciudadanos responsables.



Los estudiantes suelen quedar muy sorprendidos. Si bien ven que me cubro con un hiyab —saben, por tanto, que soy musulmana practicante—, oyen que acepto la evolución como un mecanismo para explicar la diversidad y el desarrollo de las especies, y cito a Charles Darwin como un científico que ha contribuido a nuestra comprensión del origen y la diversificación de la vida en la Tierra.

Algunos alumnos se quejaron a la universidad de que su maestra predicaba contra el islam. Pero las autoridades se mostraron satisfechas al saber que la fuente de mi material didáctico eran libros de texto aprobados por el centro. Felicité a los que habían protestado, por atreverse a defender aquello en lo que creían, y les invité a discutir juntos sus inquietudes.

En clase, ofrezco una explicación detallada de la evolución natural de las plantas y de su mejora artificial mediante cruzamiento. Más tarde, discutimos sobre la resistencia a los antibióticos, las vacunas contra la gripe y los medicamentos contra el VIH. Tras estos debates, la mayoría de los estudiantes están abiertos a aceptar la evolución como un mecanismo para la aparición de todas las especies... excepto la nuestra. Muchos citan el Corán, interpretado en el sentido de que Adán, y, por tanto, los humanos, fueron creados espontáneamente. La evolución humana sigue siendo tabú porque los alumnos no están dispuestos a renunciar a la idea de que fuimos creados de manera diferente. Les recuerdo entonces que los musulmanes deben evitar la arrogancia y que los humanos son solo una parte de la creación.

Eruditos musulmanes como Hussein Al-Jisr y Ahmad Medhat apoyaron hacia 1880 la evolución. Ya en el siglo IX, Al-Jahiz y otros propusieron teorías evolutivas rudimentarias. Cabe señalar que la controversia sobre la evolución y el islam no surgió hasta el siglo XX, cuando las ideas de Darwin se asociaron al colonialismo, el imperialismo, Occidente, el ateísmo, el materialismo y el racismo. Otros eruditos religiosos musulmanes se decantaron por una posición contraria a la evolución, que el público adoptó. Utilizaron argumentos creacionistas cristianos y así transfirieron al islam la guerra de Occidente entre ciencia y religión.

Para algunos de mis estudiantes, aceptar la evolución significa negar la existencia de Dios. A estos les digo que la evolución no habla del origen del universo. Para mí, el principio fue Dios. Después, las reglas de la lógica y la ciencia condujeron al desarrollo del universo y más allá.

Muchos musulmanes están de acuerdo con esa visión, entre ellos varios científicos, que no lo dicen públicamente por temor a ser tildados de agitadores. También algunos eruditos religiosos la apoyan, pero prefieren un cambio de opiniones gradual, a fin de no levantar barreras y frenar el progreso.

En mi opinión, el Corán fomenta la observación y contemplación del mundo, al mismo tiempo que celebra la búsqueda del conocimiento. Pero no valida los hallazgos científicos. La ciencia nos permite preguntarnos y descubrir cómo funciona el mundo; el Corán proporciona las pautas morales para hacerlo. En caso de discrepancia, podemos dirigirnos tanto a la ciencia (que está en constante evolución) como a la interpretación del Corán (que no es imparcial, pues es un ejercicio humano) para resolverla.

Que un estudiante acepte o no la evolución humana no afecta a su nota de examen. Como educadora, mi objetivo es ayudar a los alumnos a pensar de manera independiente. No quiero que escriban que aceptan la evolución solo para aprobar. Prefiero que muestren el argumento que utilizaron para llegar a su conclusión, aunque esta niegue la evolución humana. De lo contrario, estaría haciendo lo mismo que hacen quienes rechazan la evolución: forzar la opinión.

Mi objetivo es que los alumnos desarrollen un método racional para evaluar el mundo y elaborar sus propias opiniones, hipótesis y teorías, y no copiar las de otros. Es un llamamiento a nuevas formas de pensar, un viaje en búsqueda del conocimiento, uno de los principios básicos del islam. Si lo conseguimos, contribuiremos a la creación de una generación de científicos musulmanes librepensadores.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 520, pág. 409, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015



Steven D. Miller es investigador científico principal en el Instituto de Cooperación para la Investigación Atmosférica de la Universidad estatal de Colorado.

TELEDETECCIÓN

Vigilancia nocturna por satélite

Un sensor que puede ver en la oscuridad revela nueva información a meteorólogos, grupos de extinción de incendios, equipos de búsqueda e investigadores en todo el mundo

Steven D. Miller

EN SÍNTESIS

El nuevo sensor de «banda de día y noche» integrado en un satélite detecta luces en la Tierra mucho más débiles que las que podían detectar sensores anteriores.

El instrumento también puede divisar nubes, nieve y otros elementos que quedan escondidos en una noche sin luna, alumbrado únicamente por la luminosidad atmosférica.

Está ayudando a rastrear objetos que de noche son casi invisibles, como huracanes, humo de incendios forestales y barcos perdidos en alta mar.

Si se añadieran sensores similares en satélites geoestacionarios se obtendría una grabación de 24 horas de las luces terrestres, en lugar de las instantáneas que se toman dos veces al día.



CANICA NEGRA: Mediante la composición de imágenes tomadas durante dos meses por el sensor de banda de día y noche en el satélite Suomi-NPP, un equipo de analistas de datos por satélite confeccionó esta singular vista nocturna de la Tierra.

A NADIE LE GUSTA ESTAR «A OSCURAS» SOBRE LO que sucede a su alrededor, especialmente en situaciones peligrosas. No obstante, cuando la noche cae sobre un continente o un océano, los científicos y los meteorólogos pierden de repente una información muy valiosa: imágenes por satélite registradas en el visible que pueden poner de manifiesto tormentas turbulentas, el humo sofocante de un incendio forestal, enormes trozos de hielo marino que amenazan a barcos y muchos más elementos.

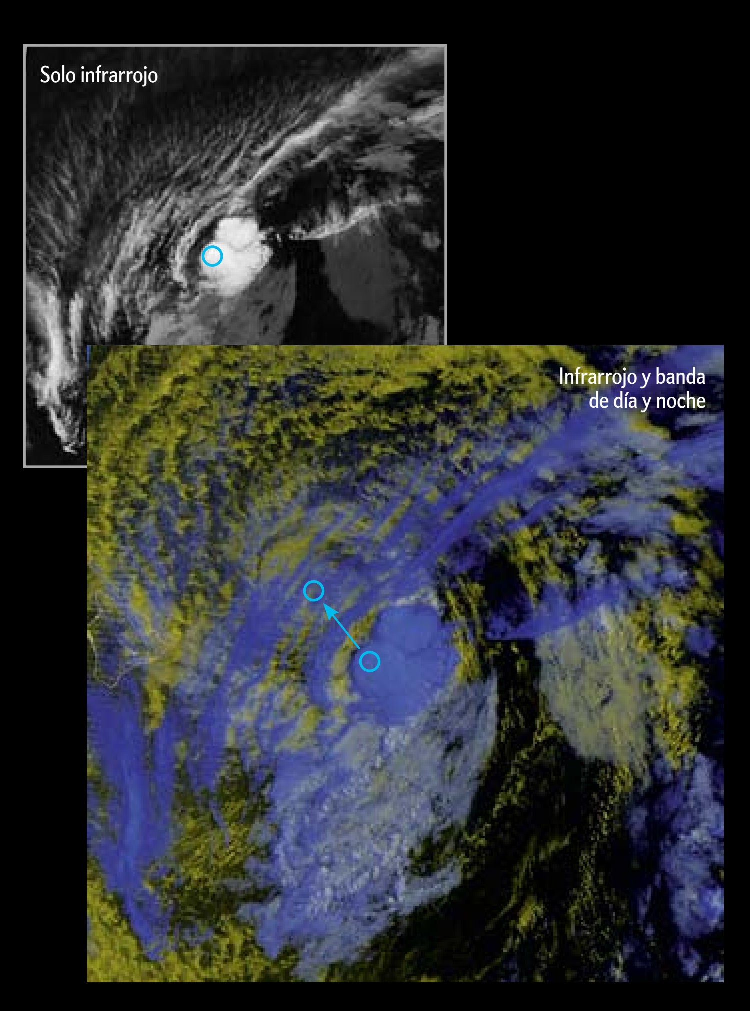
Un nuevo artefacto, el sensor de «banda de día y noche» (BDN) comienza a llenar ese vacío. Forma parte del Radiómetro de Imágenes en Infrarrojo y Visibles integrado en el satélite Suomi-NPP. El instrumento es tan sensible que puede medir el brillo de una única farola, así como la luz de la cubierta de un barco solitario en medio de una noche cerrada en el océano Atlántico o una llama parpadeante de gas en los vastos campos petrolíferos de Dakota del Norte. Incluso en una noche sin luna, el sensor puede distinguir nubes y campos nevados, bajo la iluminación del propio débil brillo nocturno de la atmósfera.

En los tres últimos años, los investigadores que trabajan con el nuevo instrumento han observado aspectos fascinantes de elementos terrestres, como enormes ondas de energía lanzadas hacia la atmósfera superior en el transcurso de tormentas violentas. Además, han mejorado la capacidad de los meteorólogos para prevenir a la población sobre la trayectoria de huracanes, han ayudado a los bomberos al monitorizar las columnas en movimiento de humo letal y han alejado a barcos perdidos de corrientes de icebergs.

El sensor BDN, que ya es útil por sí mismo, también complementa a los sensores que trabajan en el infrarrojo y que tienen problemas para identificar nubes bajas y terrenos nevados que durante la noche tienden a confundirse con los parajes circundantes. Además, los científicos empiezan a introducir los datos de este sensor en un programa de ordenador que especifica la cantidad de luz lunar presente en una noche concreta, lo que les ayuda a determinar la reflectancia de una nube y con ello conocer la humedad que contiene. Los meteorólogos pueden usar esta información para predecir cómo afectarán las nubes a las temperaturas nocturnas en tierra firme y ayudar a los pilotos a evitar condiciones peligrosas de formación de hielo en los aviones. Los datos también pueden mejorar los pronósticos meteorológicos diarios para comunidades de altas latitudes que soportan una oscuridad perpetua durante meses y carecen de información crítica nocturna sobre la combinación de condiciones meteorológicas cambiantes que les afecta.

Actualmente solo hay un sensor BDN en órbita. El satélite Suomi-NPP, controlado por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA, por sus siglas en inglés), vuela en una órbita de 800 kilómetros de altitud y sincronizado con el Sol; por tanto, pasa sobre una determinada posición aproximadamente a las 13:30 hora local y de nuevo unas doce horas más tarde. Si se incorporasen estos sensores en satélites que sobrevuelan en órbita geoestacionaria, los científicos podrían realizar una grabación continua de las luces en todo el mundo en lugar de captar únicamente instantáneas.

Una posible plataforma para esa visión nocturna es una futura serie de Satélites Geoestacionarios Operacionales Ambientales (GOES, por sus siglas en inglés), cuyo lanzamiento lo está planificando la NOAA para la década de 2030. Si llevasen un sensor de tipo BDN, los investigadores podrían determinar el patrón de cambio de las luces en tierra y mar y hacer un completo seguimiento nocturno de nubes, lluvia, manchas de petróleo, incendios, humo, tormentas de polvo, volcanes y hielo. También podrían rastrear barcos que pescaran ilegalmente en aguas restringidas y ayudar a localizar aviones accidentados, como los de los desastres de Malaysia Airlines, Air Algérie y AirAsia.



CAZADOR DE HURACANES

El conocimiento de la posición exacta del ojo de un huracán es crucial porque los vientos más intensos y las mayores mareas de tormenta ocurren justo a su alrededor. Un seguimiento más preciso puede salvar vidas, influir sobre las decisiones de los responsables locales de protección civil y ahorrar millones de dólares al optimizar el despliegue del personal de seguridad y los equipos de rescate.

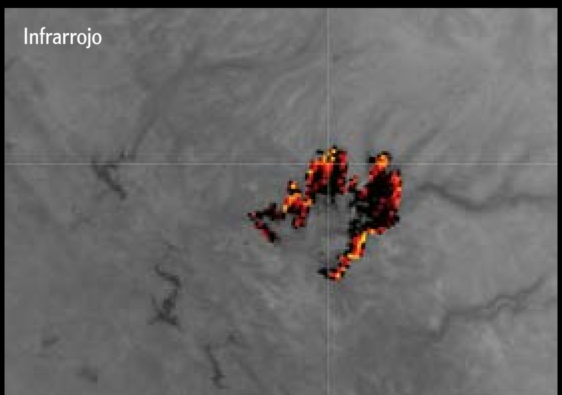
El huracán Flossie se abalanzaba sobre la isla de Hawái el 28 de julio de 2013. Los meteorólogos trazaban minuciosamente su trayectoria, pero al hacerse de noche, perdieron de vista el ojo del huracán. Unos cirros altos oscurecieron el centro de circulación en el nivel inferior de la tormenta para los sensores infrarrojos de los satélites de seguimiento (*imagen en blanco y negro*). En el transcurso de la noche, comenzó a aumentar la inquietud de los meteorólogos ante una posible «sorpresa al amanecer». Ello sucede cuando creen que están siguiendo correctamente la trayectoria nocturna de un huracán, pero al llegar el nuevo día descubren que su centro se ha desplazado de las nubes más profundas debido a cambios de los vientos en los niveles superiores que influyen sobre la dirección y orientación de estas tormentas.

Por fortuna, el satélite que transporta el sensor BDN sobrevoló el huracán en las horas anteriores al amanecer. Escudriñó justo a través de las finas nubes altas (*azul en la imagen en color*) y mostró la circulación cerca de la superficie del huracán (*amarillo*). Las imágenes revelaron que el centro de la tormenta estaba mucho más al norte de lo esperado (*desplazamiento hacia el noroeste del círculo azul*), y representaba una amenaza menor para la isla. Los meteorólogos del Servicio Meteorológico Nacional en Honolulu emitieron rápidamente una predicción a las 5 de la mañana, donde se alertaba al personal de emergencias sobre el cambio en la trayectoria de la tormenta. Ello evitó una evacuación innecesaria y permitió ahorrar miles de dólares.

RESCATE EN ALTA MAR

El pesquero *Kiska Sea* es un integrante estadounidense de la flota de pesca de cangrejos del mar de Bering (y uno de los protagonistas de la serie de televisión *Pesca radical*). En febrero de 2014, fuertes vientos septentrionales azotaron el centro del mar de Bering, empujando rápidamente hielos marinos a la deriva hacia la región donde la flota había desplegado sus nasas, un tipo de artes de pesca. La tripulación del *Kiska Sea*, que en ese momento era el pesquero situado más al norte, estableció contacto el 10 de febrero con el Servicio de Hielos Marinos de la Agencia Meteorológica Nacional en Anchorage, Alaska, para conocer el estado del hielo cerca de su línea de 150 nasas, cada una tan grande como una cama de matrimonio.

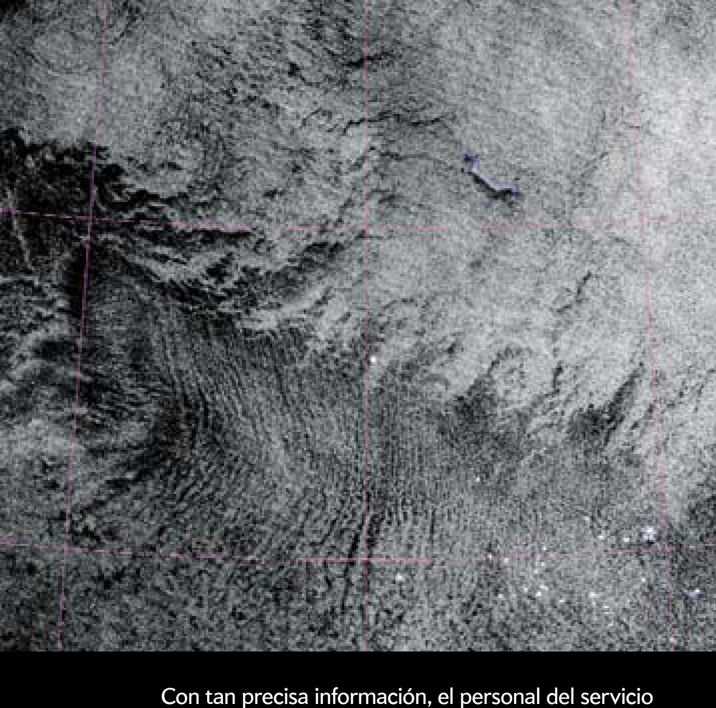
El servicio meteorológico confirmó que el hielo estaba traspasando los límites. El *Kiska Sea* se dirigió a recoger las nasas, manteniendo el contacto con el personal del Servicio de Hielos. Pero el 13 de febrero el pesquero se encontró rodeado por el hielo, que en algunas zonas alcanzaba cerca de un metro de espesor. Para evitar volcar o ser aplastado, el *Kiska Sea* debía abandonar rápidamente esa posición, pero las escasas horas de luz diurna y una noche sin luna hacían que la navegación fuese traicionera. El Servicio de Hielos usó los datos del sensor BDN para localizar las luces del barco y determinó su posición con exactitud (*punto blanco en el centro; se ven otros barcos en la esquina inferior derecha*). El sensor también trazó el límite del hielo, iluminado por el tenue brillo nocturno atmosférico (*líneas quebradas desplazándose hacia abajo desde arriba a la derecha*).



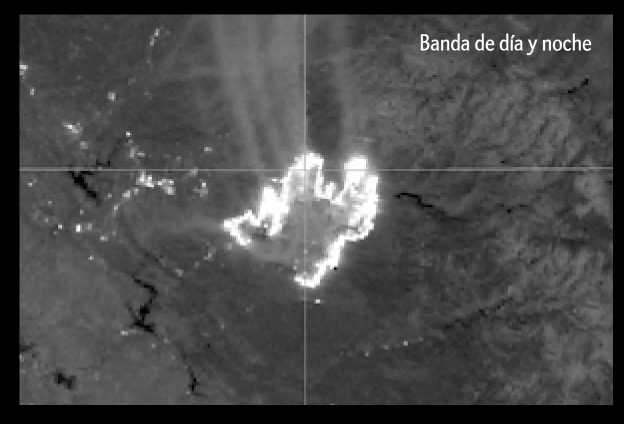
ESCUDRIÑAR A TRAVÉS DE UNA CORTINA DE HUMO

Los incendios forestales aumentan en el oeste de Estados Unidos, en parte debido a sequías que abarcan varios años. Los equipos de extinción de incendios que combaten estas violentas conflagraciones durante el día con frecuencia pierden terreno por la noche, cuando se hace difícil seguir el humo peligroso y los frentes de fuego que este oscurece. Los incendios también pueden producir fuertes vientos que cambian de dirección y modifican la velocidad y la dirección de las llamaradas, lo que de repente pone en peligro la vida de los bomberos. La temperatura del humo disminuye rápidamente hasta alcanzar la de la atmósfera circundante; ello hace que estas columnas de pequeñas partículas sean casi invisibles durante la noche para los sensores de infrarrojo de los satélites. Con frecuencia los sensores tampoco detectan las pequeñas explosiones que se producen a lo largo de los frentes de fuego.

COMPOSICIÓN DE IMÁGENES POR SATÉLITE CORTESÍA DEL OBSERVATORIO TERRESTRE DE LA NASA (*páginas anteriores*); IMÁGENES DE STEVEN D. MILLER (*esta página y la siguiente*)

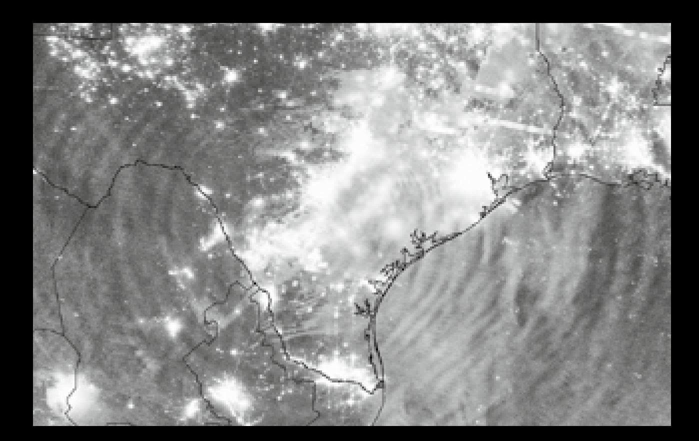


Con tan precisa información, el personal del servicio meteorológico ayudó al capitán del barco a trazar una trayectoria segura hacia el oeste-sudoeste, alejada del bloque de hielo en movimiento. La «luz nocturna» atmosférica de la Tierra ayudó a llevar al *Kiska Sea* hacia un lugar seguro.



CORTESÍA DE WILLIAM STRAKA, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON E INSTITUTO DE COOPERACIÓN PARA ESTUDIOS METEOROLÓGICOS POR SATÉLITE (*arriba a la derecha*)

La imposibilidad de combatir los incendios durante la noche resulta frustrante porque las horas nocturnas son ideales para ganar ventaja: la temperatura es inferior, la humedad mayor y los vientos más suaves. Los sensores para luz de baja intensidad pueden ser de gran utilidad en estas situaciones, como muestran las imágenes del gran incendio de Yosemite en 2013. Cuando se dispone de luz de luna, los sensores pueden mostrar las columnas de humo con claridad, lo que proporciona una advertencia fiable a los bomberos (*imagen derecha; el humo no está presente en la imagen izquierda, que es infrarroja*). Además, pueden localizar con mayor precisión los frentes de fuego y cualquier pequeña explosión (*mayor detalle en la imagen derecha*). Las columnas de humo también contienen información valiosa sobre los vientos de superficie que avivan las llamas. La imagen derecha muestra fuertes vientos meridionales que transportan el humo hacia el norte; este dato sería de gran utilidad para los bomberos, que podrían atacar el incendio desde sus flancos meridionales.



NUESTRA LUZ NOCTURNA ATMOSFÉRICA

Incluso en una noche sin luna, lejos de cualquier fuente luminosa, podemos ver una difusa silueta de nuestra mano contra el cielo «negro». Ello se debe a la tenue luz que producen ciertas reacciones químicas complejas en la atmósfera superior. Los astronautas en la Estación Espacial Internacional informan regularmente sobre este «brillo nocturno», pero los detalles sobre su estructura todavía no se conocen. Los investigadores que trabajan con el sensor BDN quedaron sorprendidos cuando observaron que los datos recogidos de noche cerca de una tormenta mostraban las ondas características de la luminosidad nocturna. La energía liberada en las tormentas emite ondas atmosféricas que se propagan en dirección ascendente. Cuando, al cabo de una o dos horas, estas ondas alcanzan una altitud de 90 a 100 kilómetros, cerca del límite superior de la mesosfera, perturban la capa de luminosidad nocturna, formando unas ondas concéntricas relucientes. Como en otras ocasiones, el sensor captó este efecto durante una intensa tormenta en Texas durante 2014 (*arriba*).

Las ondas son algo más que una simple curiosidad; transportan energía que impulsa la circulación de la atmósfera superior. La capacidad del sensor BDN para detectar ondas y ondulaciones está llenando un vacío existente en modelos de la dinámica de la atmósfera superior, lo que ayuda a los investigadores a realizar mejores predicciones meteorológicas y a comprender el cambio climático. Las observaciones realizadas en la superficie también han relacionado las ondas de luminosidad nocturna con importantes terremotos, como el que produjo el devastador tsunami cerca de Tohoku, Japón, en 2011. Parece que los movimientos sísmicos producen ondas de presión que se desplazan en dirección ascendente en la atmósfera. Es posible que el sensor BDN ayude a los científicos a identificar tsunamis cuando cruzan una cuenca oceánica, mediante el seguimiento de las ondas atmosféricas que se desplazan por encima de ellos.

PARA SABER MÁS

Out of the blue and into the black: New views of the Earth at night. Michael Carlowicz. Observatorio de la Tierra de la NASA. Publicado en Internet el 5 de diciembre de 2012. **http://earthobservatory.nasa.gov/Features/IntotheBlack**

Illuminating the capabilities of the Suomi national polar-orbiting partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band. Steven D. Miller et al. en *Remote Sensing*, vol. 5, n.º 12, págs. 6717-6766, diciembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Visión nocturna. Ver en verde. Mark Fischetti en *IyC*, octubre de 2003.



César A. Hidalgo es profesor asociado de artes y ciencias en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y dirige el grupo de investigación «Macro Connections» en el Media Lab del MIT.



TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

Planeta disco duro

¿Cuánta información puede almacenar la Tierra y cuán llena está a día de hoy? La respuesta revela hechos sorprendentes sobre el crecimiento del orden en el universo

César A. Hidalgo

EN SÍNTESIS

Si definimos la información como orden y calculamos la cantidad de información que nuestro planeta puede almacenar, nos daremos cuenta de que, a pesar de millones de años de vida y miles de años de actividad cultural humana, el disco duro terrestre está prácticamente vacío.

Esta estimación nos dice algunas cosas interesantes sobre la aparición del orden en el universo. Si bien las leyes de la naturaleza son hostiles al orden (la entropía tiende a crecer), la información aumenta a lo largo del tiempo.

Los humanos somos parcialmente responsables del crecimiento de la información en la Tierra, pero seguimos estando muy limitados en nuestra capacidad para crear orden.

GREG MABLY

En 2002, Seth Lloyd, profesor de computación cuántica del Instituto de Tecnología de Massachusetts, publicó una fórmula que estimaba el número de bits que podían almacenarse en el universo. El bit es la unidad fundamental de información y representa la respuesta a una pregunta de tipo sí/no. Un ordenador almacena bits en sus transistores, pero un bit también puede almacenarse en el estado de una partícula, por ejemplo, en el espín del electrón. La fórmula de Lloyd usaba la relación entre información y estado físico para calcular la velocidad a la que un sistema podía procesar y almacenar información como función de la constante de Planck (una cantidad inimaginablemente pequeña que resulta fundamental en mecánica cuántica), la velocidad de la luz y la edad del universo. Lloyd dedujo que nuestro universo puede almacenar hasta 10^{90} bits, o un billón de billones de billones de billones de billones de billones de billones de megabits.

Lloyd llegó a esa fórmula mediante su trabajo en ordenadores cuánticos, que usan átomos para almacenar información y realizar operaciones. Esto le llevó a plantearse el universo en términos de los bits que pueden almacenarse en sus partículas. Ideó un experimento mental preguntándose: ¿cuál es el ordenador más grande que se puede construir? La respuesta: uno que use todas y cada una de las partículas del universo. Ese ordenador podría almacenar 10^{90} bits.

Pero la belleza de la fórmula de Lloyd reside en que puede utilizarse para estimar los límites de la capacidad de almacenamiento de cualquier sistema físico, no solo del universo. En fecha reciente he intentado relacionarla con los límites computacionales de las sociedades y economías. La fórmula no tiene en cuenta muchos aspectos sobre la complejidad social y económica inherente a nuestras economías, pero sirve para darnos una aproximación grosera de la capacidad de estos sistemas para almacenar y procesar información. Pensemos en la Tierra como en un disco duro. De acuerdo con la fórmula de Lloyd, nuestro planeta puede almacenar 10^{56} bits, aproximadamente un billón de billón de billón de billones de gigaoctetos. La siguiente pregunta es: ¿cuán lleno está este disco duro planetario?

Para responder, vamos a considerar los trabajos de Martin Hilbert y Priscila López. En 2011, Hilbert y López, en aquel entonces en la Universidad del Sur de California y la Universidad Abierta de Cataluña, respectivamente, publicaron en *Science* una estimación de la información cultural existente en nuestro planeta en forma de textos, vídeos y fotos. Concluyeron que hasta 2007 el ser humano había generado 2×10^{21} bits, o dos billones de gigaoctetos. Pero hay mucha más información en nuestro planeta que la almacenada en objetos culturales. La información se halla también en artefactos diseñados por los hombres (coches, zapatos) y en sistemas biológicos (ribosomas, mitocondrias, ADN). De hecho, la mayor parte de la información que contiene la Tierra tiene la forma de biomasa. Según la fórmula de Lloyd, la Tierra contiene unos 10^{44} bits de información. Aunque puede parecer un número enorme, representa solo una fracción minúscula de la capacidad del globo. Si el ser humano continuase generando 10^{21} bits cada año, tardaría más de un cuatrillón de veces la edad del universo en llenar el disco duro planetario.

Esos cálculos nos dicen que, si bien la capacidad de almacenamiento de la Tierra es enorme, el orden es aún raro. Este punto de vista arroja luz sobre el modo en que la información es creada y procesada en el planeta y de los obstáculos que pueden limitar su crecimiento en el futuro.

EL UNIVERSO COMPUTACIONAL

La primera cosa que revela el vacío de información en nuestro planeta es que resulta difícil crear información, preservarla y combinarla para dar lugar a nueva información. Esta conclusión encaja con nuestra experiencia y tiene su razón de ser en la hostilidad del universo ante la emergencia de nuevo orden. La segunda ley de la termodinámica nos dice que el universo tiene una predilección por el desorden. El calor fluye de lo caliente a lo frío, la música se desvanece al viajar por el aire y la leche se mezcla con el café. Esta tendencia al desorden se conoce como crecimiento de la entropía.

Aun así, hay lagunas que permiten al orden crecer. Pensemos en una célula, el cuerpo humano o la economía. Estos sistemas altamente organizados desafían, de forma local, el crecimiento de la entropía que gobierna el universo como un todo. Los sistemas ricos en información solo pueden existir en tanto que «suden» entropía, pagando el alto nivel de organización en forma de calor. «La entropía es el precio de la estructura», dijo el premio Nobel de química Ilya Prigogine.

El orden emerge o se mantiene en el universo gracias a tres trucos. El primero, y quizá más familiar, conlleva un flujo de energía. Imagine una bañera llena de agua: las moléculas viajan en direcciones arbitrarias, chocando unas contra otras. Pero si quitamos el tapón, el agua empieza a bajar por la cañería en forma de remolino y el orden emerge: las moléculas de agua presentan una velocidad y dirección similares a las de sus vecinas más cercanas. Estas correlaciones constituyen la semilla de la información macroscópica. Para comprender no solo el origen sino la permanencia del orden, necesitamos un segundo truco: la existencia de sólidos. Las estructuras «sólidas», tales como el ADN, permiten que el orden se preserve por períodos largos de

tiempo. Sin ellas la información sería demasiado efímera para combinarse y crecer.

Pero para entender la emergencia de formas de orden más complejas (como la información almacenada en una ciudad o en una economía) o la creación de orden que da lugar a la vida y a las sociedades en nuestro planeta, necesitamos el tercer truco: la capacidad de cálculo de la materia. Un árbol, por ejemplo, viene a ser un ordenador que «sabe» en qué dirección deben crecer sus raíces y ramas. Los árboles saben cuándo activar o desactivar genes para luchar contra ciertos parásitos, cuándo germinar o cambiar las hojas, y cómo absorber carbono de la atmósfera por medio de la fotosíntesis. Como ordenador, un árbol genera orden en la macroestructura de sus ramas y en la microestructura de sus células. Normalmente no pensamos en los árboles como ordenadores, pero el hecho es que un árbol contribuye al crecimiento de información en nuestro planeta debido a su capacidad de cálculo.

IMAGINACIÓN CRISTALIZADA

Otra cosa sorprendente que aprendemos al considerar nuestro planeta como un disco duro es que, a pesar de la tendencia natural a destruir el orden, la información crece de forma gradual. El disco duro de la Tierra está más lleno hoy que ayer o hace un billón de años. Esto se debe, en parte, a la aparición de la vida: la biomasa contiene una gran cantidad de información. Pero el crecimiento del orden en la Tierra se debe también a la producción cultural.

Para comprender el porqué, comparemos una fruta con un ordenador personal. Lo que nos interesa es el orden que contienen estos objetos. Una fruta alberga información que estaba presente en la Tierra antes de la llegada del ser humano (existían manzanas antes de que nosotros las llamásemos «manzanas», les pusiésemos precio o las vendiésemos en mercados). Un ordenador, en cambio, existió primero en la mente de una persona, y solo más tarde como un objeto físico. Es un trozo de imaginación «solidificado». Como veremos, este tipo de objetos son bastante especiales.

Las especies que pueden imaginar un objeto y después crearlo tienen una ventaja enorme sobre las demás. Los que una vez fueron objetos imaginarios y que nuestra economía difunde nos enriquecen, ya que nos permiten usar el conocimiento presente en el sistema nervioso de otras personas. Consideremos la pasta de dientes. La mayoría de la gente la usa sin saber sintetizar el fluoruro de sodio, su principio activo. Sin embargo, esta falta de conocimientos no le excluye de los beneficios que el dentífrico ofrece. La gente hace un uso práctico del conocimiento de los demás por medio de productos, que no son nada más que imaginación solidificada. Los productos nos enriquecen y los mercados nos hacen no solo más ricos, sino más sabios.

El problema es que crear productos nuevos no es sencillo. Muchas veces requiere la colaboración de un gran número de personas. Para contribuir al crecimiento de la información, la gente necesita formar redes con la habilidad de «calcular» productos nuevos. Necesitamos redes porque la capacidad de cálculo individual, al igual que la de almacenamiento, es limitada. Las células son ordenadores biológicos que transcienden sus límites de computación uniéndose en organismos pluricelulares. La gente también tiene límites computacionales y los sobrepasa formando redes profesionales y sociales. Es precisamente esta encarnación de la computación (de las células a las economías pasando por las personas) la que hace posible el crecimiento de formas complejas de información.

LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

La última lección de este experimento mental es que la habilidad de las redes humanas para crear información es bastante limitada. Olvídense de los macrodatos: desde un punto de vista cósmico, estamos creando una cantidad de información muy pequeña —a pesar de que hemos quemado suficiente energía en el proceso como para provocar el calentamiento del planeta.

Nuestra capacidad para crear información se halla limitada, en parte, por nuestra habilidad para formar nuevas redes, que, a su vez, está limitada por factores históricos, institucionales o técnicos. Las barreras lingüísticas, por ejemplo, restringen las posibilidades de conectar a personas de distintas partes del globo. La tecnología puede ayudar a salvar estos obstáculos. El crecimiento de los vuelos y las comunicaciones intercontinentales han reducido el coste de las interacciones entre personas separadas por una gran distancia, permitiendo así construir redes globales que potencian nuestra capacidad de procesar la información. Aun así, ello no es ninguna panacea. A pesar de que nuestra capacidad para procesar información es mayor que en décadas anteriores, sigue siendo pequeña.

¿Cómo evolucionará el crecimiento de la información en la Tierra en los próximos siglos? Siendo optimistas, la globalización y la tecnología ganarán la batalla a las instituciones cerradas o conservadoras como la religión y el patriotismo, ayudando a reducir las diferencias históricas que a día de hoy continúan inspirando el odio entre personas de distintos orígenes lingüísticos, étnicos, religiosos o nacionales. Mientras tanto, los cambios tecnológicos traerán una era de hiperconectividad. La electrónica evolucionará de portátil a ponible y luego a implantable, dando lugar a nuevas formas de interacción social.

A lo largo de los milenios, nuestra capacidad de crear información se ha basado en la habilidad para guardar información en el entorno, sea a base de fabricar hachas afiladas o de escribir poemas épicos. Este talento ha impulsado nuestra capacidad de cálculo. Estamos en un período de transición que tiene el potencial de cambiar esta dinámica y hacerla más poderosa. Este milenio verá cómo los hombres y las máquinas se funden por medio de aparatos que conectarán las computadoras biológicas que son nuestros cerebros con las máquinas digitales, producto de la curiosidad de nuestras mentes. Esta sociedad hiperconectada presentará a nuestra especie algunos de los dilemas éticos más importantes de la historia. Podríamos perder algunos aspectos de nuestra humanidad que consideramos consustanciales: por ejemplo, podríamos burlar a la muerte. Pero puede que esta simbiosis entre nuestro cuerpo y las máquinas que hemos imaginado sea la única forma de que la información siga creciendo. Fuimos creados a partir de información y ahora, poco a poco, creamos información.

PARA SABER MÁS

Information is physical. Rolf Landauer en *Physics Today*, vol. 44, n.º 5, págs. 23-29, mayo de 1991.

Computational capacity of the universe. Seth Lloyd en *Physical Review Letters*, vol. 88, n.º 23, art. 237.901, 10 de junio de 2002.

Why information grows: The evolution of order, from atoms to economies. César Hidalgo. Basic Books, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Computación en agujeros negros. Seth Lloyd e Y. Jack Ng en *IyC*, enero de 2005.



M. Charles Liberman es profesor de otología y laringología en la Escuela de Medicina de Harvard y director de los Laboratorios Eaton-Peabody en el Hospital de Ojos y Oídos de Massachusetts. Es especialista en el estudio de las vías nerviosas que enlazan el oído interno con el cerebro.



NEUROCIENCIA

SORDERA OCULTA

Los martillos neumáticos, los conciertos y otras fuentes de ruido cotidianas pueden causar daños irreversibles en el oído de un modo inesperado

M. Charles Liberman

Las aficiones de los Seahawks de Seattle y los Chiefs de Kansas City compiten en sus respectivos estadios por lograr el récord Guinness del estadio más estridente. El 1 de octubre de 2014, los Chiefs consiguieron la marca más alta: 142,2 decibelios (dB). Esa intensidad equivale a la del estruendo de un avión reactor que sobrevuele a treinta metros de altura, un ejemplo arquetípico de lo que los especialistas en audición consideran un ruido más que suficiente para causar lesiones auditivas. Acabado el encuentro, los hinchas no ocultaban su euforia. La experiencia había sido francamente divertida y salieron del estadio con los oídos zumbando y la sensación de que los tímpanos iban a estallar de un momento a otro. Pero lo que les estaba sucediendo a sus oídos no era nada divertido, en absoluto.

Si antes y después del partido se hubieran sometido a una prueba de audición, habrían mostrado un deterioro notable. El sonido más tenue que un aficionado podía oír antes del saque inicial, como unas palabras susurradas, habría resultado inaudible llegado el medio tiempo. Y después del pitido final, el umbral de audición se habría elevado hasta unos 20 o 30 dB. A medida que el zumbido de los oídos mengua con los días, el resultado de la prueba de audición, el audiograma, suele recuperar los valores normales y la capacidad para oír sonidos tenues se restablece.

Durante tiempo se pensaba que, cuando los umbrales recuperaban la normalidad, el oído también lo hacía. Pero hace poco hemos demostrado que esta suposición resulta falsa. Las exposiciones que provocan un aumento de los umbrales, aunque solo sea temporal, pueden causar daños inmediatos e irreversibles en las fibras del nervio auditivo, el cual transmite la información acústica al cerebro. Si bien ese daño tal vez no afecte la detección de los tonos, tal y como indica el audiograma, sí puede alterar la capacidad para procesar las señales más complejas. Este trastorno, descrito en tiempo reciente, se ha denominado sordera oculta porque un audiograma normal puede no reflejar el daño nervioso y el deterioro auditivo asociado.

Si la persona sigue poniendo a prueba sus oídos, las fibras nerviosas acabarán perjudicadas. De hecho, ese daño puede contribuir al deterioro gradual de la capacidad de discriminar las sutilezas del habla en las personas de mediana edad y en los ancianos. La sordera oculta, empero, no se limita a los mayores. Las últimas investigaciones indican que cada vez afecta a los más jóvenes de nuestra sociedad industrial debido a su elevada exposición a sonidos fuertes, unos evitables y otros no.

PRODIGIO SENSORIAL

La vulnerabilidad del oído estriba en su sensibilidad prodigiosa, que le permite operar en un amplísimo abanico de niveles sonoros. La capacidad para percibir un sonido quedó en frecuencias próximas a las 1000 oscilaciones por segundo, o hercios (Hz) —es decir, el umbral a partir del cual percibimos ese sonido— se define como

BRIAN STAUFFER

cero decibelios. En esta escala logarítmica, cada aumento de 20 dB equivale a multiplicar por diez la amplitud de las ondas sonoras. A 0 dB, los huesecillos del oído medio, cuyas vibraciones impulsan el proceso de la audición, se mueven menos que el diámetro de un átomo de hidrógeno. En el otro extremo, como los valores superiores a los 140 dB registrados en el partido de los Chiefs, el oído soporta ondas sonoras diez millones de veces más amplias.

La audición comienza cuando el oído externo encauza las ondas sonoras a través del canal auditivo hasta el tímpano, el cual, con su vibración, pone en movimiento los huesecillos del oído medio. Estas vibraciones se desplazan a su vez hasta un tubo relleno de líquido situado en el oído interno, la cóclea, que alberga células ciliadas dispuestas en una larga cinta espiral, el órgano de Corti. Estas células reciben su nombre por las proyecciones filiformes que presentan, los estereocilios, que se extienden en haces desde uno de sus extremos. Las células ciliadas más sensibles a las frecuencias bajas se ubican en un extremo de la espiral coclear, y las más sensibles a las frecuencias altas, en el extremo opuesto. Cuando las ondas sonoras doblan los cilios, las células convierten las vibraciones en señales químicas y emiten una molécula del neurotransmisor glutamato en el otro extremo, en el lugar donde cada célula establece sinapsis con las fibras del nervio auditivo.

En la sinapsis, el glutamato liberado por la célula ciliada atraviesa una hendidura estrecha y se une a los receptores del otro lado, en el botón terminal de una fibra del nervio auditivo. Cada botón corresponde al extremo de una neurona desde el que se extiende una larga fibra, el axón, hasta el tronco encefálico. La unión del glutamato a las fibras nerviosas desencadena un impulso eléctrico que recorre el nervio auditivo hasta el tronco encefálico. Desde allí, los impulsos recorren una serie de circuitos neurales paralelos que atraviesan varias regiones, entre ellas el mesencéfalo y el tálamo, y acaban su viaje en la corteza auditiva. Esta compleja red de circuitos analiza y organiza nuestro entorno acústico en un conjunto de sonidos reconocibles, ya sea una melodía familiar o el aullido de una sirena.

Las células ciliadas se dividen en dos tipos: internas y externas. Las externas amplifican los movimientos generados por el sonido en el oído interno, mientras que las internas traducen esos movimientos en las señales químicas que excitan el nervio auditivo. Las células internas son las principales responsables de lo que entendemos como «audición», puesto que el 95 por ciento de las fibras del nervio auditivo forman sinapsis solo con ellas. El motivo de la escasez de conexiones entre las fibras nerviosas y las células externas sigue representando un misterio, pero se ha especulado con que las fibras conectadas a ellas podrían intervenir en el dolor que experimentamos cuando la intensidad acústica se acerca a los 140 dB.

Tradicionalmente, la sordera se ha venido evaluando sobre todo mediante el audiograma. Los otólogos saben desde hace tiempo que los trabajadores que golpean con martillo láminas de metal para dar forma a las calderas suelen sufrir una pérdida auditiva permanente que afecta a los tonos de frecuencias medias. Los audiogramas miden la capacidad para detectar tonos en bandas de frecuencia de octava: por ejemplo, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. En las primeras fases de la pérdida auditiva causada por el ruido, el audiograma revela la llamada «sordera de los caldereros», esto es, la incapacidad para captar sonidos en las frecuencias medias del espectro de audición humano.

En los años cincuenta y sesenta del siglo pasado, los estudios epidemiológicos con obreros de fábricas ruidosas demostraron una clara relación entre la antigüedad del empleado y el declive de la agudeza auditiva. El déficit inicial, próximo a los 4000 Hz, con el tiempo tendía a extenderse a otras frecuencias. Muchos trabajadores veteranos sufren una sordera absoluta por encima de los 1000 o 2000 Hz. Esa pérdida de tonos agudos causa un grave déficit auditivo porque buena parte de la información del habla recae en la banda de frecuencias afectada.

Los estudios en humanos como los anteriores impulsaron al Gobierno de EE.UU. a elaborar en los años setenta las directivas sobre ruido para limitar la exposición en el lugar de trabajo. Hoy, varios organismos federales regulan los niveles de ruido en el entorno laboral, como el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Laboral o la Administración de Salud y Seguridad Laboral (OSHA, por sus siglas en inglés); los distintos organismos recomiendan límites diversos. La falta de concordancia demuestra la dificultad que entraña valorar el riesgo de daño asociado al ruido. Ello se debe a dos motivos. En primer lugar, existen enormes diferencias individuales en la sensibilidad al ruido: se puede decir que hay oídos «duros» y oídos «sensibles». Ello significa que las autoridades reguladoras han de escoger el porcentaje de la población que pretenden proteger y el nivel de pérdida auditiva que consideran aceptable. El otro problema se debe a que los efectos del ruido sobre la audición son el resultado de una compleja combinación de duración, intensidad y frecuencia de los sonidos a los que se está expuesto.

En la actualidad, la OSHA exige que los niveles sonoros no excedan los 90 dB en una jornada de ocho horas. El riesgo de daño por encima de ese límite es proporcional a la energía total que recibe el oído (duración multiplicada por la intensidad). Por cada 5 dB adicionales que superen el límite fijado para la jornada de ocho horas, la OSHA recomienda reducir a la mitad el tiempo de exposición; es decir, ningún trabajador debería someterse a 95 dB más de cuatro horas diarias o a 100 dB más de dos horas al día. Según estas medidas, la exposición a 142 dB de los aficionados que competían por el récord Guinness habría excedido las normas en unos 15 segundos. Por supuesto, la OSHA no regula los niveles de ruido de las aficiones en los encuentros de fútbol americano, ni tampoco en las granjas de EE.UU., donde los jóvenes que conducen tractores y cosechadoras todo el día están expuestos a un grave riesgo de pérdida auditiva.

En los últimos 60 años, los otólogos han dado por hecho que las lecturas ordinarias del audiograma revelan todo lo que hay que saber sobre el daño auditivo causado por el ruido. El audiograma indica si las células ciliadas internas sufren alguna alteración, y las investigaciones de los años cuarenta y cincuenta hacían pensar que eran de las más vulnerables a los excesos acústicos.

EN SÍNTESIS

Los ruidos fuertes embotan los oídos y causan zumbidos, pero se solía creer que el oído era capaz de recuperarse sin secuelas.

Los niveles altos de ruido pueden causar daños permanentes en las fibras nerviosas que transmiten el sonido hasta el cerebro.

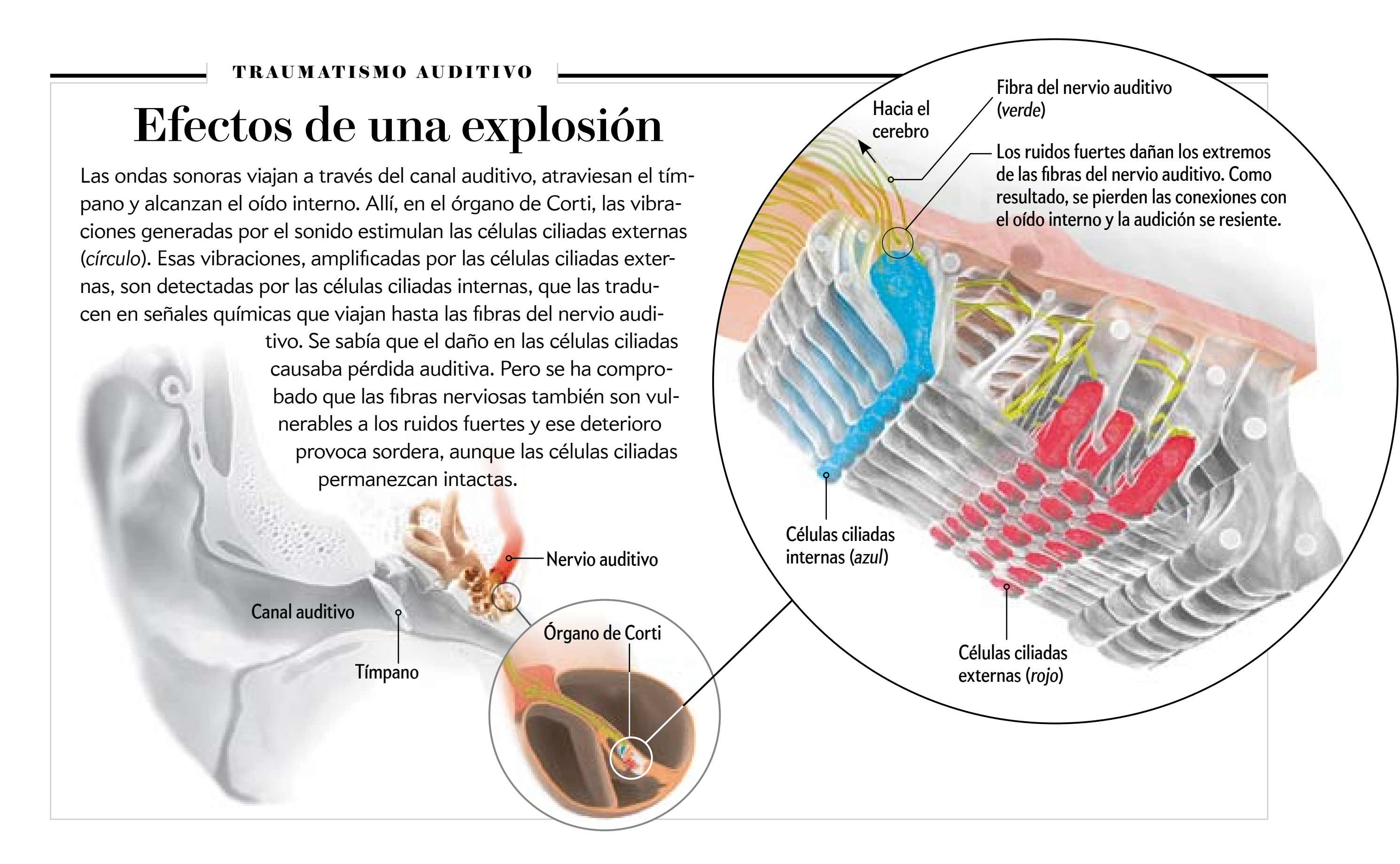
La pérdida oculta de audición permite al afectado escuchar sonidos pero no entender lo que dice su interlocutor.

Una solución a este problema ubicuo podría ser un fármaco que facilitara la recuperación de las fibras nerviosas dañadas.

TRAUMATISMO AUDITIVO

Efectos de una explosión

Las ondas sonoras viajan a través del canal auditivo, atraviesan el tímpano y alcanzan el oído interno. Allí, en el órgano de Corti, las vibraciones generadas por el sonido estimulan las células ciliadas externas (*círculo*). Esas vibraciones, amplificadas por las células ciliadas externas, son detectadas por las células ciliadas internas, que las traducen en señales químicas que viajan hasta las fibras del nervio auditivo. Se sabía que el daño en las células ciliadas causaba pérdida auditiva. Pero se ha comprobado que las fibras nerviosas también son vulnerables a los ruidos fuertes y ese deterioro provoca sordera, aunque las células ciliadas permanezcan intactas.



BRYAN CHRISTIE

Pero los experimentos con animales, algunos realizados en nuestro laboratorio, han demostrado que las células ciliadas externas son más vulnerables que las internas; que las células ciliadas de la parte de la cóclea que detecta los tonos agudos son más frágiles que las situadas en la región de las bajas frecuencias, y que, una vez destruidas, las células ciliadas no se regeneran. Y aun antes de que estas degeneren, el ruido fuerte puede alterar los haces de estereocilios que tapizan su parte superior, otro daño irreversible. Cuando las células ciliadas sufren daños o mueren, los umbrales auditivos se elevan; hay que subir el volumen de la radio o el compañero en el otro lado de la mesa debe alzar la voz.

El estudio en profundidad del daño coclear en los humanos tropieza con el serio escollo que representa la imposibilidad de extraer en vivo las minúsculas células ciliadas o captar imágenes con las técnicas actuales. El daño que conlleva la pérdida auditiva causada por el ruido solo ha sido estudiado en personas que habían donado sus oídos a la ciencia después del fallecimiento.

En parte a causa de tales limitaciones, la pregunta de si la sordera asociada al envejecimiento es irremediable, o si es consecuencia de la exposición reiterada al bullicio de la vida moderna, sigue desconcertando a los expertos. Un indicio incitante lo aportan estudios de los años sesenta llevados a cabo en grupos humanos de entornos singularmente silenciosos, como la tribu mabaan del desierto de Sudán. Los hombres de 70 a 79 años dieron mejores resultados en las pruebas de audición que un grupo de varones estadounidenses de la misma edad. Por supuesto, tales estudios no contemplaron otras diferencias entre el estadounidense y el mabaan medio, como las relacionadas con la dotación genética o la alimentación.

DAÑO PROFUNDO

Investigaciones recientes hechas por mis colegas y por mí acerca de los efectos del ruido en la audición han añadido una nueva dimensión que invita a la reflexión sobre los peligros de la exposición excesiva al ruido. Científicos y médicos saben desde hace tiempo que parte del daño auditivo causado por el ruido es reversible y parte no. Dicho de otro modo, en ocasiones los umbrales de audición recuperan la normalidad horas o días después de la exposición; en otras, la recuperación es incompleta y el umbral elevado persiste para siempre. Los especialistas en audición solían creer que si el umbral de sensibilidad se recuperaba, el oído se había restablecido por completo. Ahora sabemos que no es cierto.

Los estallidos de los fuegos de artificio en las verbenas estivales o el clamor del público en un partido de fútbol no solo afectan a las células ciliadas, sino también a las fibras nerviosas auditivas. Mi equipo y otros autores demostramos en los años ochenta que el ruido daña las terminaciones nerviosas que forman sinapsis con las células ciliadas. La inflamación y la consiguiente destrucción de los botones terminales probablemente se deba a una liberación excesiva de glutamato por parte de las células ciliadas sobreestimuladas. De hecho, la liberación excesiva de glutamato en cualquier punto del sistema nervioso resulta tóxica. Siempre se ha pensado que esas fibras dañadas por el ruido se regeneran tras la exposición a un ruido intenso, porque los oídos con una inflamación galopante del nervio a causa de la exposición recuperan los umbrales auditivos normales.

Pero en nuestro laboratorio dudábamos de que esas sinapsis tan deterioradas pudieran restablecerse en el oído adulto. También sabíamos que el daño nervioso provocado por el ruido no siempre se detecta en las pruebas ordinarias, ya que ciertos estudios con animales realizados en los años cincuenta habían demostrado que la destrucción de fibras auditivas, si no hay pérdida de células ciliadas, no afecta al audiograma hasta que la destrucción resulta masiva, superior al 80 por ciento. Al parecer, no es preciso contar con una densa población de fibras ner-

EN POCOS PASOS

Consejos para proteger los oídos

En los estudios llevados a cabo con varias especies de animales bastaron dos horas de exposición continua a un ruido de 100 a 104 decibelios (dB) para causar daños nerviosos irreversibles en el oído. Hay sobradas razones para pensar que el oído humano es igual de sensible. La mayoría de las exposiciones cotidianas al ruido no son tan prolongadas, pero resulta prudente no permanecer sin protección ante ningún sonido que supere los 100 dB.

Muchos ruidos habituales nos abocan a esa zona de peligro. En los conciertos y las discotecas no es raro alcanzar picos de 115 dB y niveles medios superiores a los 105 dB. Un soplador de hojarasca o un cortacésped alcanzan niveles de entre 95 y 105 dB, igual que algunas herramientas eléctricas, como la sierra de disco. La frecuencia del sonido es importante. Con el mismo nivel de decibelios, el chirrido agudo de una lijadora de banda es más peligroso que el estruendo ronco de una motocicleta con el tubo de escape trucado. Los martillos neumáticos pueden someter a los transeúntes a 120 dB, y el repiqueteo del cincel metálico contra el hormigón da lugar a multitud de peligrosos chasquidos agudos.

¿Cómo evitar los daños? Hoy en día casi todos podemos disponer de sonómetros sumamente precisos en nuestro bolsillo. Hay numerosas aplicaciones gratuitas o módicas para teléfonos iOS y Android que ofrecen lecturas fiables de la presión acústica producida por un instrumento musical o el petardeo de un automóvil, con diferencias de 1 o 2 dB respecto de los costosos sonómetros profesionales. La mejor aplicación para iOS en mi opinión, Sound Level Meter Pro, cuesta menos de 20 dólares y en el laboratorio dio lecturas con una precisión superior a 0,1 dB.

Una vez conscientes del tipo de sonidos ambientales que resultan peligrosos, la buena noticia es que la protección auditiva es barata, fácil de usar y se puede llevar a cualquier parte. Bien colocados, los tapones de espuma pueden atenuar el nivel de sonido unos 30 dB en las bandas de frecuencia más peligrosas. Deben apretarse haciéndolos rodar entre los dedos e introducirlos tanto como se pueda en el canal auditivo. No es más difícil ni peligroso que colocarse unos auriculares internos.

Si se asiste a un concierto, esos tapones de espuma amortiguan demasiado el sonido, por lo que si deseamos evitarlo debemos utilizar «tapones de músico». En Internet pueden adquirirse varias marcas por entre 10 y 15 dólares el par. Están concebidos para atenuar el sonido entre 10 y 20 dB, con amortiguación equitativa de los sonidos graves y los agudos, por lo que el timbre de la música no se ve alterado.

Y, lo más importante, debemos prestar atención a nuestros oídos. Si al término de un evento o una actividad percibimos que están embotados, como si lleváramos algodón, o sentimos zumbidos o pitidos, lo más probable es que se hayan destruido algunas sinapsis del nervio auditivo. No debemos perder la calma, pero sí procurar que no vuelva a suceder.

140 decibelios Motor a reacción
130 Detonación de arma
120 Martillo neumático
110 Concierto/discoteca
100 Pérdida auditiva con 2 horas de exposición
Cortacésped
90 Pérdida auditiva con 8 horas de exposición
Motocicleta
80 Tráfico urbano
70 Aspiradora
60 Conversación normal
50 Rumor de la lluvia

AMANDA MONTAÑEZ

viosas para captar un tono en el interior de una cabina de pruebas. Por analogía, si se toma una fotografía digital de un grupo de personas y se la observa a una resolución cada vez menor, se comprobará que, a medida que la densidad de los píxeles disminuye, los detalles se difuminan. Es posible reconocer que en la fotografía aparecen personas, pero no saber quiénes son. De modo similar, pensamos que la pérdida difusa de neuronas altera la capacidad para captar un sonido, pero puede degradar con facilidad la comprensión del habla en un restaurante concurrido.

Cuando comenzamos a investigar el daño nervioso provocado por el ruido en los años ochenta, el único modo de contar las sinapsis entre las fibras nerviosas auditivas y las células ciliadas internas era mediante microscopía electrónica con cortes en serie, un método muy laborioso que exigía un año de trabajo para analizar las sinapsis en un puñado de células ciliadas de la cóclea. Veinticinco años después, junto con Sharon G. Kujawa, del Hospital de Ojos y Oídos de Massachusetts, intentamos averiguar si un episodio de sobreestimulación acústica en ratones jóvenes podía acelerar la sordera asociada a la edad. El ruido que soportaron los roedores estaba concebido para producir solo una elevación temporal de los umbrales auditivos, sin ningún daño permanente en las células ciliadas. Como era de prever, las cócleas de los roedores no mostraron ninguna anomalía días después de la exposición. Pero cuando examinamos algunos ejemplares entre seis meses y dos años después, apreciamos una pérdida de fibras nerviosas auditivas, pese a la presencia de células ciliadas intactas.

Por suerte, desde los años ochenta se han logrado enormes avances en el estudio de la estructura molecular de las sinapsis del oído. Hoy disponemos de anticuerpos que, conjugados con colorantes fluorescentes, reconocen estructuras situadas a ambos lados de la sinapsis entre la célula ciliada interna y la fibra del nervio auditivo. De ese modo, resulta sencillo contar las sinapsis con la ayuda un microscopio óptico. No tardamos en obtener datos que demostraban que, pocos días después de la exposición al ruido, cuando el umbral auditivo había recuperado la normalidad, hasta la mitad de las sinapsis del nervio auditivo habían desaparecido y no se regeneraban nunca. Al cabo de pocos meses se hizo patente el deterioro del resto de las neuronas (los somas celulares y los axones proyectados hacia el tronco encefálico). Y, después de

dos años, la mitad de las neuronas auditivas había desaparecido por completo. En cuanto las sinapsis se degradaban, las fibras afectadas perdían toda funcionalidad y no respondían a ningún sonido, cualquiera que fuese su intensidad.

En los últimos años hemos constatado la degeneración de las sinapsis provocada por el ruido en ratones, cobayas y chinchillas, así como en tejido de cadáveres humanos. En estudios con animales y en oídos humanos hemos comprobado que la pérdida de conexiones entre las fibras del nervio auditivo y las células ciliadas precede a las elevaciones del umbral de audición que conlleva la destrucción de tales células. La idea de que el nervio lesionado deriva en un tipo de sordera oculta (un componente destacado de la sordera a causa del ruido y la asociada al envejecimiento) goza cada vez más de mayor aceptación. En estos momentos numerosos especialistas trabajan en la elaboración de pruebas que determinen si el problema se halla generalizado y si nuestros hábitos bulliciosos están provocando un daño auditivo de dimensiones epidémicas en personas de todas las edades.

LA REPARACIÓN DE LOS NERVIOS

En palabras llanas, el audiograma, la prueba de audición de referencia, determina los umbrales auditivos y constituye un medidor sensible del daño de las células ciliadas de la cóclea, pero un mal indicador del ocasionado en las fibras nerviosas auditivas. Nuestras investigaciones han demostrado que el daño nervioso en la sordera oculta no afecta la capacidad para detectar sonidos, pero seguramente degrada nuestra facultad para entender el habla y otros sonidos complejos. De hecho, tal vez sea uno de los responsables de la clásica queja de los ancianos: «Escucho hablar a la gente, pero no entiendo lo que dicen».

Los audiólogos saben desde hace tiempo que dos personas con audiogramas similares pueden dar resultados muy distintos en las pruebas de reconocimiento del habla en presencia de ruido, que cuantifican el número de palabras reconocidas con un ruido de fondo creciente. Hasta ahora tales discrepancias habían sido atribuidas al procesamiento cerebral. Nuestros datos indican que una buena parte se debería a diferencias en la población superviviente de fibras nerviosas auditivas.

La sordera oculta también podría explicar otros trastornos frecuentes, como los acúfenos (zumbidos en el oído) y la hiperacusia (intolerancia a sonidos de intensidad moderada). Estos trastornos persisten aun cuando el audiograma no indique anomalía alguna. Antaño, médicos y científicos pensaban que si el audiograma de una persona con acúfenos o hiperacusia era normal, el problema debía radicar en el cerebro. Nosotros, en cambio, creemos que el daño podría hallarse en el nervio auditivo.

Nuestra investigación suscita cuestiones sobre los riesgos de la exposición cotidiana a volúmenes altos en conciertos y discotecas, así como a través de los auriculares personales. Si bien la pérdida auditiva representa un problema frecuente entre los músicos profesionales, incluso entre los de música clásica, los estudios epidemiológicos de oyentes esporádicos no han conseguido hallar un impacto sustancial en sus audiogramas. Las directivas estadounidenses elaboradas para minimizar los daños por el ruido en los trabajadores se basan en la suposición de que, si los umbrales recuperan la normalidad tras la exposición, el oído se restablece por completo. Ahora sabemos que esta premisa resulta errónea, por lo que las normativas vigentes podrían ser insuficientes para prevenir el daño nervioso causado por el ruido generalizado y el deterioro auditivo que lleva aparejado.

Dar respuesta a esa cuestión exigirá mejores pruebas diagnósticas de las lesiones del nervio auditivo que el mero recuento de las sinapsis en la autopsia. Un enfoque alentador está basado en un parámetro de la actividad eléctrica de las neuronas auditivas, denominado respuesta auditiva troncoencefálica (ABR, por sus siglas en inglés). Esta puede medirse en personas despiertas o dormidas a las que se colocan electrodos en la cabeza para determinar la actividad eléctrica (electroencefalograma) mientras escuchan ráfagas de tonos de diferentes frecuencias y niveles sonoros. Tradicionalmente, la ABR ha sido interpretada como una prueba de todo o nada. Esto es, una respuesta eléctrica clara indica una audición normal, mientras que la ausencia de respuesta denota un problema.

En experimentos con animales hemos demostrado que el parámetro aporta mucha más información. Ante niveles sonoros elevados, la amplitud de la ABR crece en proporción con el número de fibras nerviosas auditivas que mantienen una conexión viable con las células ciliadas internas. En consonancia con lo anterior, un reciente estudio epidemiológico inspirado en nuestra investigación ha aplicado una variante de la prueba ABR en un grupo de universitarios británicos con audiogramas normales y ha hallado amplitudes de respuesta más pequeñas en los asistentes asiduos a discotecas y conciertos.

En la búsqueda de tratamientos contra la sordera oculta, nos estamos preguntando si sería posible corregir la degeneración causada por el ruido al aplicar a las neuronas supervivientes sustancias concebidas para regenerar las fibras nerviosas, las cuales restablecerían las conexiones con las células ciliadas internas. Si bien la exposición al ruido destruye de inmediato las sinapsis, la lentitud de la degeneración del resto del nervio (los somas celulares y los axones) invita al optimismo ante la posibilidad de restaurar la normalidad en muchas personas. Hemos conseguido resultados alentadores en animales mediante la inoculación directa de neurotrofinas (promotoras del crecimiento nervioso) en el oído interno.

La pérdida auditiva oculta podría tratarse pronto mediante la inyección a través del tímpano de geles que liberen lentamente neurotrofinas para restaurar las sinapsis meses o años después de sufrir un traumatismo auditivo. Tales sustancias deberían administrarse inmediatamente después de la exposición al ruido intenso, como la explosión en la línea de meta de la Maratón de Boston en 2013, que provocó lesiones en los oídos a más de cien espectadores. Tal vez algún día un otólogo podrá aplicar fármacos en la cóclea mediante un tratamiento mínimamente invasivo contra el daño auditivo causado por el ruido con la misma facilidad con la que un oftalmólogo corrige la miopía con cirugía láser de la córnea.

PARA SABER MÁS

Adding insult to injury: Cochlear nerve degeneration after «temporary» noise-induced hearing loss. Sharon G. Kujawa y M. Charles Liberman en *Journal of Neuroscience*, vol. 29, n.º 45, págs. 14.077-14.085, 11 de noviembre de 2009.

Synaptopathy in the noise-exposed and aging cochlea: Primary neural degeneration in acquired sensorineural hearing loss. Sharon G. Kujawa y M. Charles Liberman en *Hearing Research*. Publicado en línea el 11 de marzo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Recuperar el equilibrio con oídos biónicos. Charles C. Della Santina en *IyC*, julio de 2010.

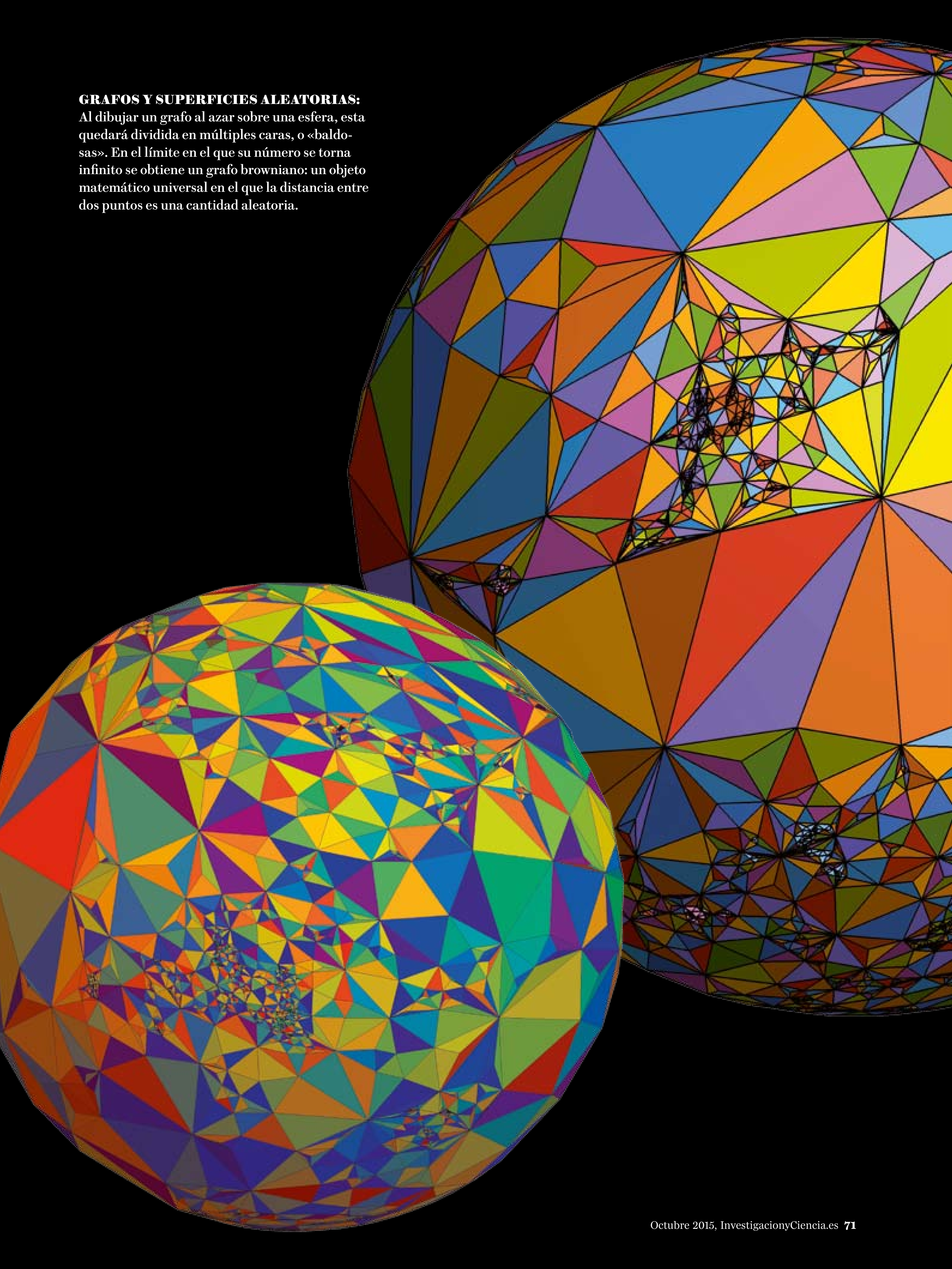
Plasticidad auditiva. Victoria M. Bajo y F. Rodríguez Nodal en *IyC*, marzo de 2012.

MATEMÁTICAS

UNA GEOMETRÍA ALEATORIA EN LA ESFERA

Los matemáticos han logrado construir un espacio en el que la distancia entre dos puntos cualesquiera es una cantidad aleatoria. El resultado, conocido como grafo browniano, abre las puertas a una nueva área de investigación

Nicolas Curien y Jean-François Le Gall



GRAFOS Y SUPERFICIES ALEATORIAS: Al dibujar un grafo al azar sobre una esfera, esta quedará dividida en múltiples caras, o «baldosas». En el límite en el que su número se torna infinito se obtiene un grafo browniano: un objeto matemático universal en el que la distancia entre dos puntos es una cantidad aleatoria.

Nicolas Curien y **Jean-François Le Gall** son profesores de matemáticas en la Universidad de París Sur, en Orsay.

NO FALTAN SITUACIONES EN LAS QUE EL AZAR INTERVIENE EN LA NATURALEZA GEOMÉTRICA de un problema. Así ocurre con el retículo que conforman los poros de un cuerpo permeable, con la red de conexiones a Internet o con la orientación de los momentos magnéticos atómicos en un imán, entre otros ejemplos. Para analizar tales fenómenos, los físicos emplean a menudo la estadística y la teoría de la probabilidad. A ello hay que sumar el trabajo de los matemáticos, quienes han estudiado tales cuestiones en virtud de su interés intrínseco.

Una línea de investigación al respecto, surgida en los años ochenta a raíz de algunos trabajos en física teórica, versa sobre las superficies aleatorias; es decir, superficies escogidas al azar. Pero ¿cómo se elige una superficie al azar? Existen varias maneras de responder con precisión a esta pregunta. Una de ellas consiste en definir una geometría aleatoria sobre la esfera a partir de los distintos grafos que pueden trazarse sobre ella. Hace poco, este enfoque ha sido objeto de interesantes y prometedores avances.

El procedimiento estriba en asociar a cada par de puntos de la esfera una cantidad escogida al azar, la cual identificaremos con la distancia que media entre dichos puntos. A pesar de ser aleatorias, tales cantidades no pueden ser completamente arbitrarias, ya que habrán de satisfacer una de las propiedades fundamentales de toda distancia: la desigualdad triangular. Esta dicta que, dados tres puntos *A*, *B* y *C*, la distancia *AC* deberá ser siempre inferior o igual a la suma de las distancias *AB* y *BC*.

La idea clave para construir distancias aleatorias consiste en partir de un número finito de puntos y, después, ir añadiendo más de forma indefinida. Imaginemos que nuestra esfera es un planeta sin océanos y repleto de ciudades conectadas por caminos. Para ser más precisos, supongamos que cada población se encuentra unida por medio de carreteras con un número pequeño de ciudades vecinas. Además, impondremos la condición de que dos caminos nunca se crucen, y también la de que haya carreteras suficientes para ir de cualquier ciudad a cualquier otra pasando por poblaciones intermedias (es decir, que no haya grupos de ciudades aislados por completo del resto). Por último, definiremos la distancia entre dos ciudades *A* y *B* como el número mínimo de etapas en un trayecto que las una (*véase la figura 1*).

En el límite en el que el número de ciudades se torna muy elevado y sus localizaciones cubren aproximadamente toda la esfera, llegaremos a una situación en la que podremos calcular la distancia entre dos puntos cualesquiera del globo. Además, dado que las distancias dependen de la disposición de las rutas, si estas últimas se escogen al azar, también las distancias tomarán valores aleatorios.

El procedimiento que acabamos de esbozar constituye la esencia de un programa de investigación muy activo desde hace diez años y que aún está lejos de haberse agotado. La motivación para tales trabajos se debe a varias cuestiones surgidas en el ámbito de la física teórica; en particular, en el estudio de la gravedad cuántica en dos dimensiones. El objetivo

EN SÍNTESIS

Inspirados en parte por cuestiones surgidas en el ámbito de la gravedad cuántica, los matemáticos han hallado una superficie en la que la distancia entre dos puntos es aleatoria.

El procedimiento consiste en considerar grafos aleatorios sobre la esfera. Cuando el tamaño de dichos grafos tiende a infinito, se obtiene un límite continuo y bien definido.

El resultado recibe el nombre de grafo browniano: un objeto universal, dotado de una geometría fractal compleja y cuyas propiedades los matemáticos apenas han comenzado a desentrañar.

último consiste en construir una teoría que unifique la relatividad general (una teoría de la gravitación) con la mecánica cuántica. Por supuesto, el caso de dos dimensiones no es el más importante desde un punto de vista práctico; sin embargo, sirve como guía teórica y ha permitido poner sobre el tapete cuestiones matemáticas tan complejas como apasionantes.

Para explicar cómo se construye una geometría aleatoria, primero habremos de introducir el concepto de grafo plano. Este nos permitirá formalizar la idea de ciudades unidas por caminos que hemos usado antes.

1. GRAFOS Y DISTANCIA: **Un grafo trazado sobre una esfera puede visualizarse como un mapa de ciudades (situadas en los nodos, o vértices del grafo) unidas por carreteras (las aristas). La distancia entre dos vértices puede definirse como el número mínimo de aristas que deben recorrerse para llegar de uno a otro. En este ejemplo, la distancia entre *A* y *B* es igual a cinco.**

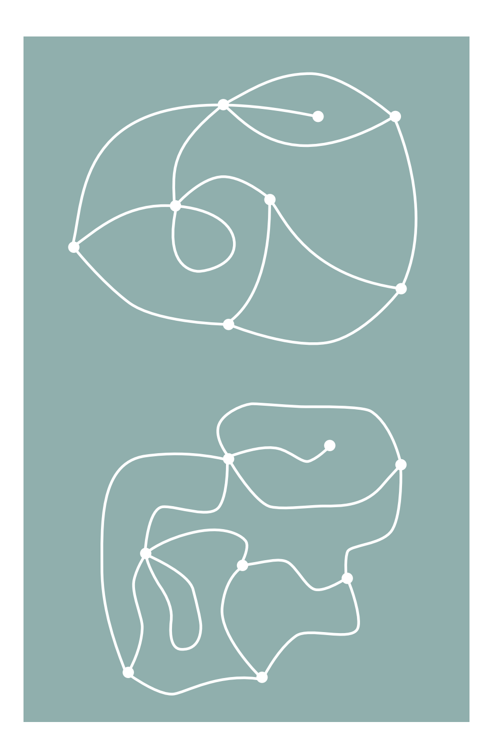
GRAFOS PLANOS

Si alguien le pide que trace un grafo, bastará con que tome una hoja de papel, dibuje un conjunto de puntos, o «vértices», y conecte algunos pares de ellos mediante líneas, o «aristas». Para no complicar demasiado las cosas, acordaremos que dos aristas nunca podrán cruzarse, y que la estructura final será tal que siempre resultará posible ir de un vértice a otro siguiendo un camino compuesto de aristas (en términos matemáticos, decimos que el grafo es «conexo»). Si usted se atiene a estas instrucciones, habrá dibujado un grafo plano.

Así pues, un grafo plano no es más que uno conexo, el cual puede trazarse sobre un plano o una esfera y cuyas aristas nunca se cruzan. Por razones técnicas, resulta más sencillo considerar grafos sobre la esfera y considerar la hoja de papel mencionada más arriba como una porción de aquella.

Hemos de enfatizar que, al hablar de grafos, lo único que nos importa es su estructura combinatoria, no los detalles concretos de su diseño. Dicho de otra forma, podemos modificar las posiciones de los vértices y deformar las aristas: mientras no modifiquemos las relaciones que existen entre estos elementos, consideraremos que el grafo plano es el mismo (*véase la figura 2*). Podemos hacer una analogía con la caligrafía de las letras del alfabeto. Si pedimos a dos personas que escriban la letra *a*, trazarán dibujos distintos, pero para nosotros representarán el mismo símbolo. Resulta fácil convencerse de que, con estas identificaciones, dado un número finito de vértices, solo existe un número finito de grafos posibles.

En nuestros grafos planos también permitiremos la existencia de aristas múltiples (en el ejemplo de las ciudades, se trataría de casos en los que dos de ellas están unidas por más de una carretera) y bucles (aristas que empiezan y terminan en un mismo vértice). Aunque las distancias entre vértices no cambian al añadir estos elementos, su introducción presenta ciertas ventajas técnicas.

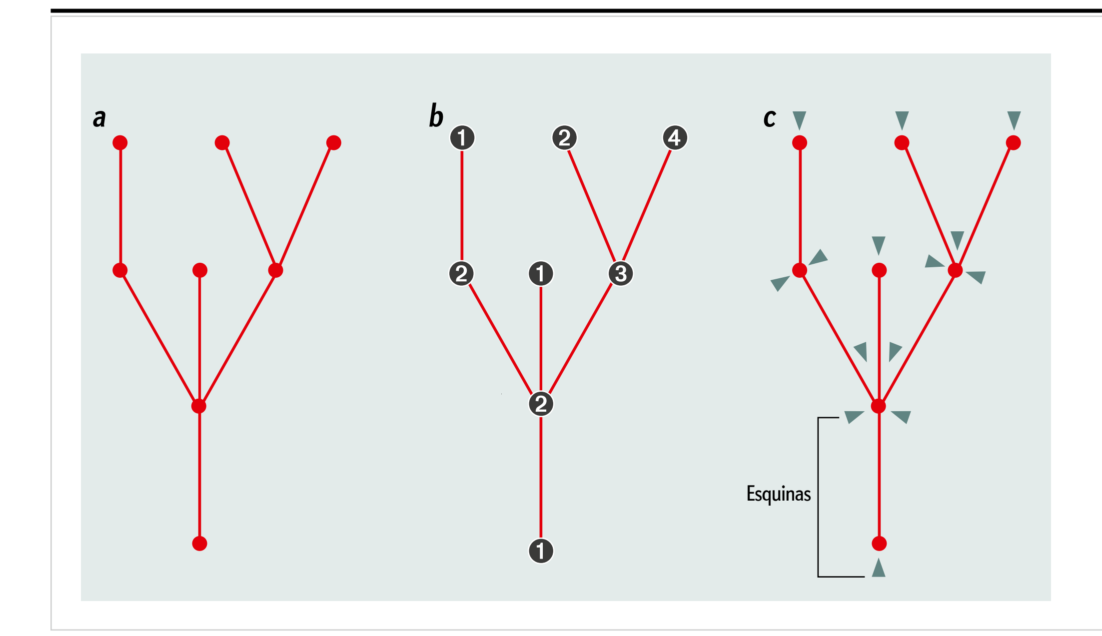


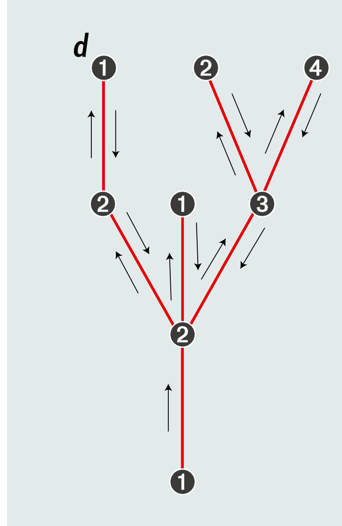
2. GRAFOS PLANOS: **Un grafo plano es uno que puede representarse sobre el plano o la esfera y en el que dos aristas nunca se cruzan. En general, al considerar un grafo solo importa su estructura combinatoria, no la disposición precisa de sus vértices y aristas. Los dos grafos reproducidos aquí son equivalentes, ya que presentan las mismas relaciones entre sus elementos.**

Además de los vértices y las aristas, un tercer componente básico de un grafo plano —que no puede definirse para el caso de un grafo genérico— son sus caras. Para visualizarlas, olvidemos la analogía de las carreteras e imaginemos que nuestro grafo representa un mapa geográfico, en el que las aristas corresponden ahora a las fronteras entre naciones. Con esta interpretación, las caras del grafo no serían más que los países; es decir, cada una de las regiones delimitadas por aristas. Es importante señalar que no hemos de olvidar la cara «externa» del grafo, ya que estamos considerando grafos (o mapas) trazados sobre la esfera.

Una propiedad clave relativa a los grafos planos nos la proporciona la fórmula de Euler, la cual se remonta al siglo XVIII. Esta dicta que, si un grafo plano posee V vértices, A aristas y C caras (incluida la externa), siempre se cumple que $V + C - A = 2$, con independencia de cuán compleja sea la estructura.

Otro resultado célebre es el llamado «teorema de los cuatro colores». Según este, si deseamos colorear las caras de un grafo plano de tal modo que nunca haya dos caras contiguas pintadas del mismo color (o, en el ejemplo del mapa, que dos países que comparten frontera tengan siempre colores distintos), nos bastarán siempre cuatro colores (*véase la figura 3*). La simplicidad del enunciado resulta engañosa. Aunque esta propiedad fue conjeturada en 1852 por el matemático y botánico sudafricano Francis Guthri —quien se interesó en el problema a partir de la coloración empleada en los mapas ingleses—, la demostración del teorema se resistió durante más de un siglo a los más prestigiosos matemáticos. La prueba llegó en los años setenta del siglo pasado de la mano de Kenneth Appel y Wolfgang Haken, de la Universidad de Illinois, quienes contaron para ello con la ayuda esencial de un ordenador; una primicia que en su momento preocupó y dividió a la comunidad de matemáticos





[*véase* «La solución del problema del mapa de cuatro colores», por Kenneth Appel y Wolfgang Haken; Investigación y Ciencia, diciembre de 1977].

EL PROBLEMA DE CONTAR GRAFOS

Uno de los matemáticos más ilustres que intentó demostrar el teorema de los cuatro colores fue William Tutte (1917-2002). Este canadiense de origen británico comenzó estudiando química hasta que, debido a su gran talento matemático, las autoridades militares británicas le reclutaron durante la Segunda Guerra Mundial para descifrar los códigos secretos nazis. Tutte se unió así al grupo de Bletchley Park, en el que ya trabajaban algunos de los matemáticos más prominentes de la época, como Alan Turing. En 1948, ya finalizada la guerra, Tutte defendió en Cambridge una tesis doctoral en matemáticas y, ese mismo año, aceptó un puesto en la Universidad de Toronto. El investigador permanecería en Canadá durante el resto de su carrera.

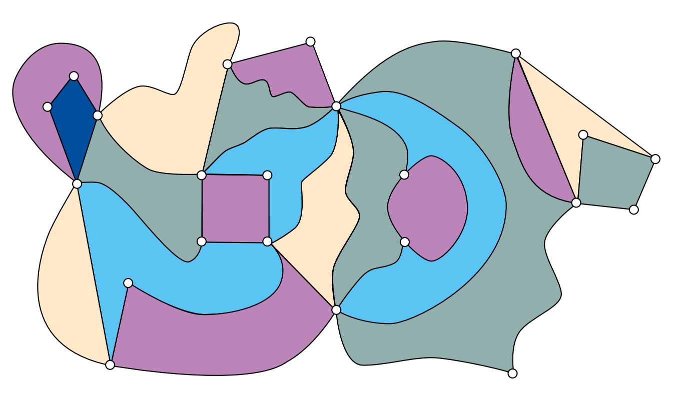
A principios de los años sesenta, y ya convertido en un experto mundial sobre teoría de grafos y combinatoria, Tutte abordó el teorema de los cuatro colores, que por aquel entonces seguía siendo una conjetura. Para ello se propuso contar, por un lado, el número de grafos planos con una determinada propiedad (por ejemplo, con un número fijo n de aristas) y, por otro, la cantidad de ellos que podían pintarse con cuatro colores. Si ambos números coincidían, el teorema quedaría establecido. Aquel programa fracasó, ya que contar el número de grafos que pueden pintarse con cuatro colores se revelaría una tarea sumamente difícil. Sin embargo, Tutte halló en el camino varios resultados sobre la enumeración de grafos planos que, con el tiempo, acabarían siendo tan importantes como el propio teorema de los cuatro colores.

Antes de describir algunos de los logros de Tutte, hemos de introducir una definición técnica. Decimos que un grafo plano está «enraizado» cuando escogemos una arista particular y le asignamos una orientación. La arista orientada tiene en su origen el «vértice raíz». Aunque pueda parecer que esta noción solo embrolla las cosas, los grafos enraizados resultan mucho más fáciles de contar. Ello se debe a que presentan menos simetrías, las cuales complican a menudo la tarea de enumerar grafos, ya que se corre el riesgo de contar el mismo varias veces.

Uno de los principales resultados obtenidos por Tutte fue la determinación del número E_n de grafos planos enraizados con n aristas. Este viene dado por la ecuación:

$$E_n = \frac{2 \cdot 3^n (2n)!}{n!(n+2)!}$$

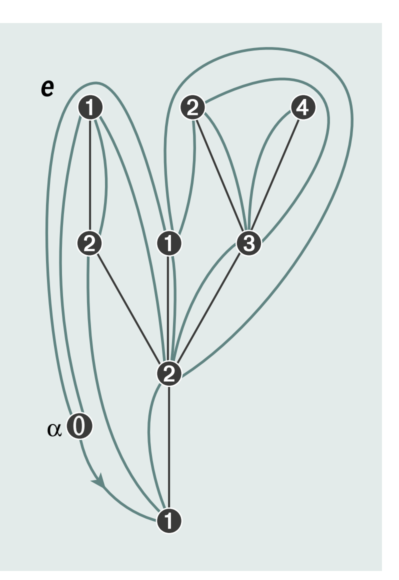
donde $n!$ denota el factorial de n; es decir, $n! = n(n-1)(n-2) \cdots 3 \cdot 2 \cdot 1$. Para grafos con una arista, obtenemos que $E_1 = 2$. Los dos casos posibles corresponden a dos vértices unidos por una arista, y a un solo vértice con un bucle. Si $n = 2$, el número de grafos distintos asciende a $E_2 = 9$. Dejamos al lector la



3. EL TEOREMA DE LOS CUATRO COLORES: Uno de los resultados más importantes en teoría de grafos establece que bastan cuatro colores para pintar las caras de cualquier grafo plano de forma que dos regiones fronterizas no presenten nunca el mismo color. El lector puede comprobar que, en este ejemplo, la «cara externa» (una cara más cuando consideramos grafos sobre la esfera) podría colorearse de azul. Al intentar demostrar este teorema, el matemático William Tutte obtuvo varios resultados clave sobre la enumeración de grafos planos.

NICOLAS CURIEN (*teorema de los cuatro colores*)

Cuadrangulaciones y árboles



Enumerar cuadrangulaciones con *n* caras equivale a enumerar árboles con *n* aristas. En concreto, existe una correspondencia, llamada biyección de CVS, entre las cuadrangulaciones enraizadas de *n* caras y aquellos árboles planos de *n* aristas cuyos vértices se encuentran «etiquetados» con un número entero positivo. Tales etiquetas han de satisfacer dos condiciones: por un lado, el primer vértice del árbol (el «ancestro», si se interpreta como un árbol genealógico) ha de tener siempre asignado el número 1; por otro, si dos vértices se encuentran unidos por una arista, la diferencia entre sus etiquetas solo podrá ser –1, 0 o 1.

Una de las posibles formas de etiquetar un árbol de 7 aristas (*a*) se encuentra representada aquí (*b*). La construcción de la cuadrangulación correspondiente requiere introducir el concepto de «esquina», o sección angular entre dos aristas sucesivas en torno a un vértice (*c*).

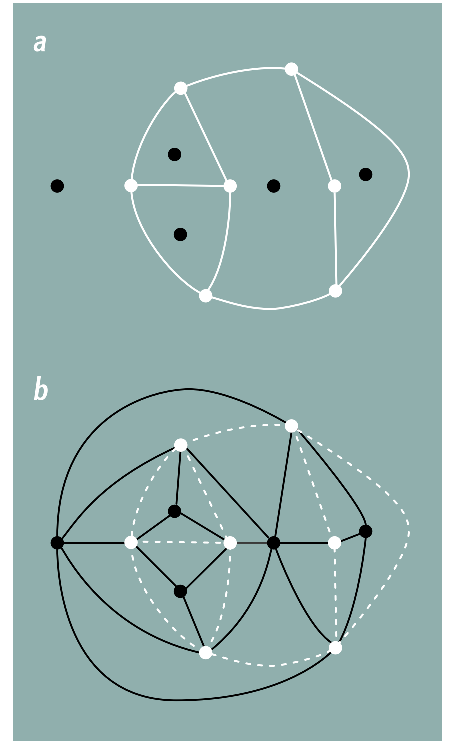
Para obtener la cuadrangulación asociada, hemos de seguir el contorno del árbol de abajo arriba y de izquierda a derecha (*d*). En cada esquina trazaremos una arista (*verde*) que la una con la última esquina hallada en el trayecto y que posea una etiqueta estrictamente menor. En el caso de una etiqueta con valor igual a 1, esta se unirá con un vértice suplementario α añadido ex profeso con la etiqueta 0 (*e*). Siempre es posible trazar todas estas aristas sin que se crucen, lo que dará como resultado una cuadrangulación. Por convenio, esta tiene como raíz la arista que une el vértice suplementario y el vértice ancestro del árbol, orientada de forma que α sea el vértice raíz. De manera recíproca, resulta posible construir un árbol etiquetado a partir de una cuadrangulación enraizada, lo que completa la biyección.

tarea de representar las distintas posibilidades, advirtiéndole de que no resulta tan sencillo y que, para distinguir bien los casos, es fundamental no olvidar que estamos considerando grafos sobre la esfera.

A continuación presentaremos una versión moderna del argumento que permite obtener la formula de Tutte para E_n, así como otros resultados relativos a la enumeración de grafos. Para ello hemos de introducir primero el concepto de cuadrangulación. Una cuadrangulación no es más que un grafo plano en el que todas las caras se encuentran delimitadas por exactamente cuatro aristas. Una vez más, hemos de recordar la cara externa del grafo, la cual también habrá de estar bordeada por cuatro aristas. Por otro lado, si una arista se encuentra contenida por completo en el interior de una cara (*a modo de ejemplo, véanse las figuras 1 y 2*), tendremos que contarla dos veces. Ello se debe a que, si imaginamos que recorremos la frontera de una cara desde el interior, pasaremos dos veces sobre dicha arista, ya que sus dos «lados» tocan la cara en cuestión.

GRAFOS Y BIYECCIONES

Un resultado sorprendente pero fácil de demostrar establece que el número de cuadrangulaciones enraizadas con *n* caras es igual al de grafos planos enraizados con *n* aristas. Esta igualdad implica que hay una forma de asignar a cada cuadrangulación enraizada con *n* caras un grafo plano enraizado con *n* aristas, y viceversa. Decimos por ello que existe una biyección entre ambos conjuntos, llamada a veces biyección de Tutte.



4. GRAFOS Y CUADRANGULACIONES: A cada grafo plano con *n* aristas puede asociarse una cuadrangulación con *n* caras. Aquí se ilustra un ejemplo en el que $n = 10$. En el interior de cada cara del grafo plano original (*blanco*) dibujamos un vértice negro (*a*). Después, trazamos aristas negras que unan los vértices negros con los vértices blancos situados en el borde de la cara correspondiente (*b*). Tras eliminar las aristas del grafo original, habremos obtenido una cuadrangulación con 10 caras.

Esta equivalencia puede entenderse fácilmente con un ejemplo (*véase la figura 4*). Llamemos G a un grafo plano enraizado con n aristas y marquemos sus vértices en blanco. Después, dibujemos un vértice negro en el interior de cada cara del grafo, y unámoslo mediante aristas con cada vértice situado en la frontera de dicha cara. Una sutileza técnica concierne al caso en que alguno de esos vértices tiene más de una «esquina» en la cara correspondiente; es decir, cuando, al recorrer la frontera, nos encontramos con el mismo vértice más de una vez (*esta situación no se reproduce en el ejemplo de la figura 4*). En tal caso, conectaremos el vértice negro con cada una de las esquinas del vértice blanco. Después de borrar las aristas del grafo inicial, veremos que el resultado es una cuadrangulación Q de n caras. De hecho, cada cara de Q se corresponde con una de las aristas iniciales. La raíz de la cuadrangulación Q puede escogerse mediante una convención apropiada a partir de la raíz de G. Aunque no la describiremos aquí, la construcción inversa resulta igualmente simple.

¿Por qué la biyección de Tutte nos ayuda a contar los grafos planos de un cierto tipo? La razón se debe a que toda cuadrangulación enraizada puede codificarse, a su vez, en un árbol. Esta clase de objetos resultan más fáciles de enumerar, ya que conforman estructuras combina-

torias más simples. Aquí nos referimos a árboles planos; es decir, a los mismos que pueden emplearse para describir la genealogía de una población que parte de un único ancestro, el cual engendra varios descendientes, que a su vez conciben otros, etcétera. Si consideramos la genealogía de la población tras un número finito de generaciones, esta quedará representada por un árbol plano con un vértice en la base (el ancestro) y en el que cada rama corresponderá a un descendiente.

En 1981, Robert Cori y Bernard Vauquelin, de la Universidad de Burdeos, hallaron una biyección entre las cuadrangulaciones enraizadas de n caras y cierto tipo de árboles planos de n aristas: aquellos en los que cada vértice tiene asignado un número entero, o «etiqueta», sujeto a dos condiciones. Por un lado, la etiqueta asociada al ancestro habrá de ser siempre 1; por otro, si dos vértices se encuentran unidos por una arista, la diferencia entre sus etiquetas solo podrá ser –1, 0 o 1 (*véase el recuadro* «Cuadrangulaciones y árboles»). Esta correspondencia entre cuadrangulaciones y árboles recibe el nombre de biyección de Cori-Vauquelin-Schaeffer, o CVS.

La combinación de la biyección de Tutte (entre grafos planos y cuadrangulaciones) y la de CVS (entre cuadrangulaciones y árboles) proporciona un método para calcular E_n a partir del número de árboles etiquetados. Un problema nada sencillo, pero más fácil que el cálculo original.

La biyección de CVS presenta otras aplicaciones de interés, algunas de las cuales mencionaremos más abajo. Hasta ahora nos hemos limitado al estudio de las cuadrangulaciones, pero hoy sabemos que existen biyecciones similares para otros tipos de grafos planos; en particular, para las triangulaciones, o grafos en los que todas las caras se encuentran delimitadas por tres aristas. Y aunque la biyección de CVS pueda parecer un mero truco combinatorio, en realidad obedece a un principio matemático profundo, el cual nos revela que todo grafo tiene asociada de manera subyacente una estructura de árbol.

GRAVEDAD CUÁNTICA Y SUPERFICIES ALEATORIAS

A finales del siglo pasado, los físicos teóricos propusieron emplear los grafos planos como modelos de geometrías aleatorias. Con ello buscaban introducir superficies que representasen las fluctuaciones cuánticas de la geometría de un universo bidimensional. Si bien un grafo plano escogido al azar proporciona un modelo discreto de superficie aleatoria, el caso continuo puede recuperarse haciendo tender a infinito el tamaño del grafo.

Recordemos que el conjunto de cuadrangulaciones enraizadas con n caras conforma un conjunto finito con E_n elementos. Para un valor dado de $n \geq 1$, escogeremos al azar una cuadrangulación Q_n. De esta manera, cada cuadrangulación de n caras tendrá la misma probabilidad de ser elegida; dicha probabilidad será igual a $1/E_n$.

Ahora hemos de interpretar el grafo aleatorio Q_n como un objeto geométrico. Tal y como avanzábamos al principio, dados dos vértices cualesquiera del grafo, podemos asignarles una distancia igual al número mínimo de aristas que hay que seguir para llegar de uno a otro. (Nótese que esta definición de distancia difiere de la usual; es decir, de la que obtendríamos al trazar el grafo sobre una hoja de papel y medir la separación entre vértices con una regla.) Una vez que disponemos de una noción de una distancia, ya estamos en condiciones de analizar algunas cuestiones relacionadas con las propiedades geométricas del grafo.

Por ejemplo, podemos preguntarnos cuánto vale el «radio» de Q_n, o $R(Q_n)$, el cual definiremos como la mayor distancia posible entre un vértice cualquiera y el vértice raíz. Por supuesto, $R(Q_n)$ será una cantidad aleatoria, ya que el grafo Q_n ha sido elegido al azar. Usando la biyección de CVS, Philippe Chassaing, de la Universidad Henri Poincaré de Nancy, y Gilles Schaeffer de la Escuela Politécnica de Francia, hallaron en 2004 que, con una probabilidad que tiende a 1 cuando n tiende a infinito, $R(Q_n)$ tiene una longitud del orden de $n^{1/4}$. En concreto, Chassaing y Schaeffer demostraron que, para todo par de números positivos a y b con $b > a$, la probabilidad de que el radio de Q_n se encuentre comprendido entre $an^{1/4}$ y $bn^{1/4}$ tiende a

$$\int_a^b f(x)dx$$

a medida que n crece, donde $f(x)$ es una densidad de probabilidad.

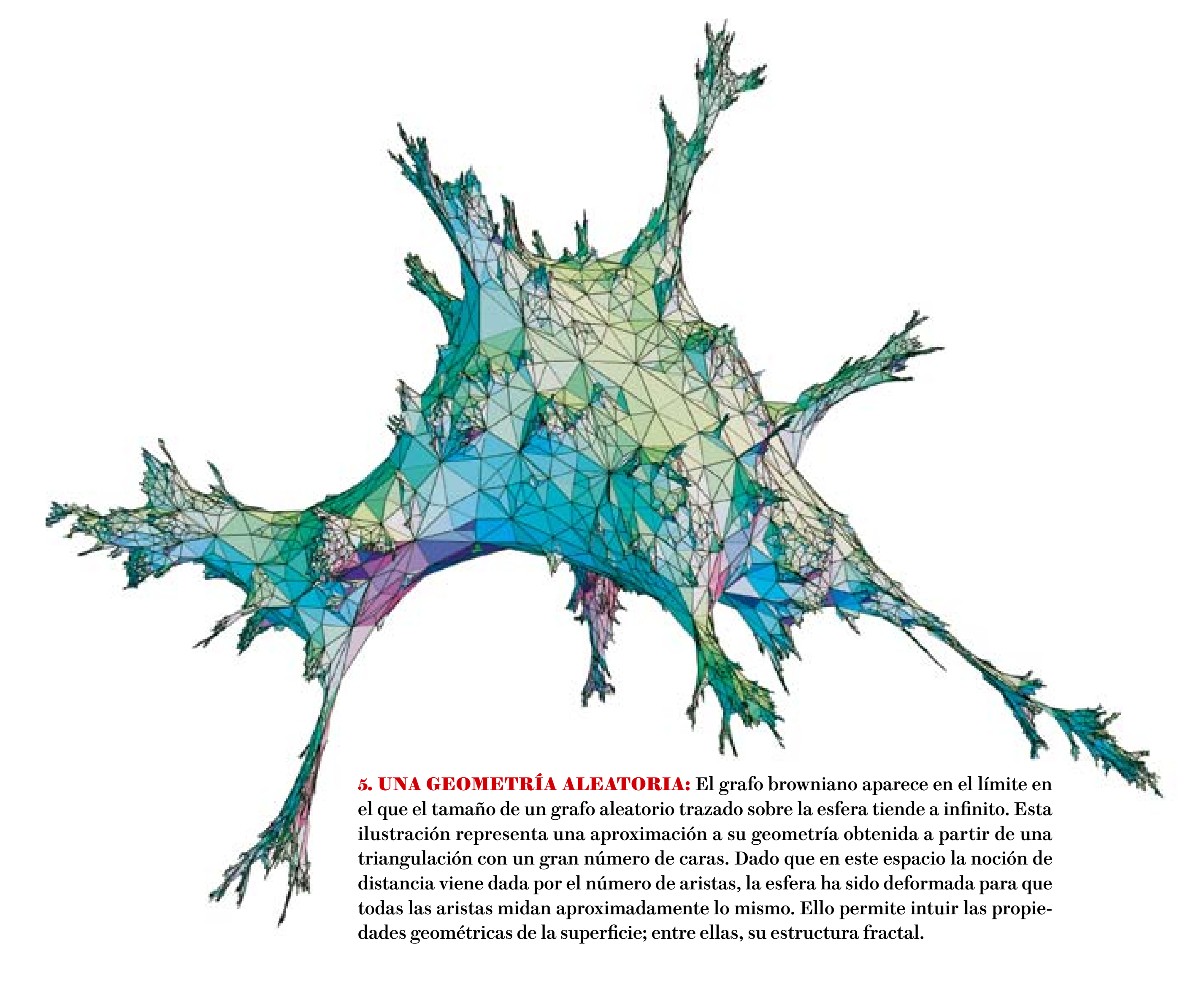
El resultado anterior nos trae a la cabeza el teorema del límite central de la teoría de la probabilidad. Este implica que, si lanzamos n veces una moneda al aire y llamamos S_n a la diferencia de caras menos cruces, la probabilidad de que S_n se halle comprendida entre $an^{1/2}$ y $bn^{1/2}$ tiende a una integral como la de arriba, en la que la densidad de probabilidad viene dada por la función gaussiana $f(x) = \exp(-x^2/2)/\sqrt{2\pi}$.

El exponente 1/4 que aparece en el radio de una cuadrangulación Q_n no deja de resultar sorprendente, ya que difiere del exponente habitual de 1/2 que dicta el teorema del límite central. Ello implica que las grandes cuadrangulaciones aleatorias presentan un comportamiento singular, muy distinto del de las cuadrangulaciones «regulares» (es decir, aquellas formadas a partir de un retículo cuadrado, como el de los cuadernos escolares). En estas últimas, el radio característico de la cuadrangulación crece como la raíz cuadrada del número de caras; es decir, como $n^{1/2}$.

El valor del exponente puede entenderse a partir de la biyección de CVS. Una propiedad notable de esta equivalencia es que las etiquetas situadas en los vértices de un árbol se corresponden, en el grafo asociado, con la distancia que media entre el vértice en cuestión y el vértice raíz (*esto puede verificarse en el ejemplo del recuadro* «Cuadrangulaciones y árboles»). Por un lado, puede demostrarse que la altura de un árbol (el número de generaciones) de n aristas es del orden de $n^{1/2}$; por otro, las etiquetas evolucionan a lo largo del árbol como una suma de variables independientes que toman los valores 1, 0 y –1. A partir del teorema del límite central, lo anterior sugiere que el orden de magnitud de una etiqueta típica emplazada en lo más alto del árbol habrá de ser $(n^{1/2})^{1/2} = n^{1/4}$. Un análisis riguroso proporciona el resultado correcto.

Una vez conocido el orden de magnitud de las distancias de grafo en Q_n, podemos preguntarnos si, cuando el número de caras tiende a infinito (y cada cara se torna más y más pequeña), existe un «espacio límite» para la cuadrangulación vista en su totalidad. En el proceso, los vértices se harán cada vez más numerosos y densos hasta que, al final, cada punto de la esfera se encontrará ocupado por un vértice. Este método debería permitirnos calcular la distancia entre dos puntos cualesquiera de la esfera, a condición de que «renormalicemos» las distancias de grafo dividiéndolas por $n^{1/4}$, de modo que el resultado arroje siempre una distancia finita.

En 2011, Gregory Miermont, de la Escuela Normal Superior de Lyon, y, de manera independiente, uno de nosotros (Le Gall), demostramos que tal espacio límite existe. Es decir, que las cuadrangulaciones aleatorias tienden a un límite continuo y bien definido a medida que el número de caras se hace infinito. El límite puede obtenerse de forma rigurosa gracias al concepto de convergencia de Grómov-Haussdorf, introducido hace tres



5. UNA GEOMETRÍA ALEATORIA: El grafo browniano aparece en el límite en el que el tamaño de un grafo aleatorio trazado sobre la esfera tiende a infinito. Esta ilustración representa una aproximación a su geometría obtenida a partir de una triangulación con un gran número de caras. Dado que en este espacio la noción de distancia viene dada por el número de aristas, la esfera ha sido deformada para que todas las aristas midan aproximadamente lo mismo. Ello permite intuir las propiedades geométricas de la superficie; entre ellas, su estructura fractal.

NICOLAS CURIEN

décadas por el matemático ruso-francés Mijaíl Grómov. Dicha idea de convergencia se basa en una definición de distancia que permite comparar espacios diferentes, cada uno de ellos equipado con su propia noción de distancia.

EL GRAFO BROWNIANO

El espacio límite descrito más arriba recibe el nombre de grafo browniano. Se trata de un objeto matemático que puede entenderse como una superficie puramente aleatoria. Aunque su topología es la de una esfera, desde un punto de vista geométrico ha de verse como una superficie llena de «púas» y dotada de una estructura fractal compleja (*véase la figura 5*).

El término fue propuesto en 2006 por Jean-François Marckert y Abdelkader Mokkadem, de la Universidad de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines. El nombre obedece a ciertas similitudes entre la superficie en cuestión y la trayectoria que experimenta una partícula microscópica suspendida en un fluido; es decir, una sujeta a un movimiento browniano. Tales trayectorias proporcionan un prototipo de curva aleatoria cuya dimensión fractal es dos; es decir, el doble que la dimensión de una curva ordinaria. De igual modo, la dimensión fractal de un grafo browniano es cuatro, el doble que la de una superficie común.

Al igual que una curva browniana surge como el límite continuo (tras una renormalización conveniente) de muchos caminos aleatorios discretos, el grafo browniano aparece como el límite continuo no solo de las cuadrangulaciones aleatorias, sino de otros grafos generados al azar, como las triangulaciones. En este sentido, los físicos hablan de la «universalidad» del grafo browniano.

El grafo browniano constituye un espacio fascinante cuyas propiedades apenas hemos comenzado a desentrañar. Sin duda, será objeto de estudio de los matemáticos durante muchos años. Queda por saber si esta geometría aleatoria y sus hipotéticas generalizaciones a dimensiones mayores que dos nos permitirán algún día descubrir los secretos de la gravedad cuántica. Pero esa es otra historia.

PARA SABER MÁS

Quantum geometry: A statistical field theory approach. J. Ambjørn et al. Cambridge University Press, 1997.

Graphs on surfaces. B. Mohar y C. Thomassen. Johns Hopkins University Press, 2001.

Aspects of random maps. G. Miermont. Curso de la Escuela de Verano sobre Probabilidad de Saint-Flour, 2014. Notas disponibles en **http://perso.ens-lyon.fr/gregory.miermont/coursSaint-Flour.pdf**

Random geometry on the sphere. J.-F. Le Gall. Charla plenaria en el Congreso Internacional de Matemáticos 2014. Presentación disponible en **www.math.u-psud.fr/~jflegall/Plenary-talk-LeGall.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo cuántico autoorganizado. Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll en *IyC*, septiembre de 2008.



ETOLOGÍA

Animales en red

En especies muy diversas, las relaciones sociales ejercen una profunda influencia en el comportamiento del individuo y del grupo

Lee Alan Dugatkin y Matthew Hasenjager

BUENA PARTE DE LA EXISTENCIA HUMANA ESTÁ condicionada por quienes integran la red social de cada persona: confiamos en la familia, en los amigos de nuestros amigos, en los compañeros de trabajo y en sus contactos para estar al corriente de todo, desde qué libros leer hasta a quién votar o a qué trabajos dedicarse. Pero no somos los únicos con esa dependencia: las redes sociales también influyen en las experiencias diarias y, por ende, en la supervivencia de los individuos de numerosas especies animales. Se sabe desde hace décadas que los chimpancés y otros primates presentan una vida social compleja. Pero estudios recientes han revelado que las actividades de aves, delfines y otras especies solo adquieren pleno sentido en su contexto social. Tales hallazgos podrían repercutir en incontables ámbitos, desde los programas de conservación hasta la comprensión de las redes sociales humanas.

EN SÍNTESIS

A semejanza de la vida humana, la existencia de numerosos animales transcurre inmersa en complejas redes sociales que influyen en el comportamiento del individuo y del grupo.

El análisis de esos sistemas animales se está llevando a cabo con técnicas concebidas para el estudio de las redes sociales humanas.

La estructura de las redes animales resulta determinante en las posibilidades de apareamiento, la propagación de enfermedades y la difusión de información, así como en la enseñanza de estrategias de supervivencia.

El análisis de esas redes demuestra que algunos individuos desempeñan un rol destacado en el mantenimiento del bienestar de la colectividad.

MARK ALLEN MILLER

Y los estudios zoológicos, que tan a menudo acuden a técnicas prestadas del examen de la conducta colectiva humana, podrían aportar datos novedosos que ayudaran a plantear nuevas investigaciones en nuestra especie.

POR QUÉ ANALIZAR LAS REDES

Los estudiosos del comportamiento animal, o etólogos, necesitaron tiempo y nuevas formas de pensar para tomar conciencia de la importancia de las redes sociales en el reino animal.

En los años treinta del siglo xx, el premio nóbel Konrad Lorenz publicó sus hoy célebres estudios donde describía la impronta de los gansos, el vínculo emocional instintivo que traba el neonato con el primer cuidador que encuentra en un período crítico del crecimiento. Pronto la idea de que la mayoría de los animales eran esencialmente autómatas, dotados de un comportamiento programado y estereotipado (controlado por los genes), se convirtió en dogma.

Pero no tardó en repararse que los factores externos interaccionaban con la programación genética. Esto es, lo innato (genes) más lo adquirido (ambiente) rigen el comportamiento animal. Aunque esta fórmula pueda parecer completa, no resulta demasiado útil, puesto que ambos sumandos abarcan casi cualquier tipo de influencia imaginable.

Se comenzó a estudiar el modo en que el aprendizaje basado en la prueba y el error modelaba el comportamiento. Las conclusiones extraídas, unidas a las observaciones de los naturalistas de campo, obligaron a reconocer que los animales eran mucho más inteligentes de lo que se pensaba: los chimpancés y los cuervos fabrican y manipulan herramientas; los loros resuelven problemas con la lógica; y los elefantes desarman cercas eléctricas lanzando piedras. En el curso del estudio de esa inteligencia manifiesta, se comenzó a observar que algunos animales gregarios adquirían comportamientos nuevos imitando a sus semejantes. Y un miembro del grupo podía percatarse de que estaba siendo vigilado por otros que intentaban obtener información de él.

Pero como bien saben los físicos, todo se complica cuando en el problema intervienen más de dos cuerpos. Por esa razón, las primeras tentativas de estudiar la interacción de los miembros de un grupo solían basarse en la interacción entre dos o tres individuos a lo sumo. La atención se centró en el animal que imitaba la elección de pareja de otro, en el miembro que medía la destreza combativa de un posible rival o en el aprovechado que arrebataba la comida a un congénere más industrioso. Cuanto más analizaban los etólogos tales comportamientos, más se convencían de que las interacciones entre ese pequeño número de individuos apenas eran un atisbo de la intrincada red de relaciones tejida por todos los integrantes del grupo.

Para entender mejor la vida social de los animales era preciso reconocer el hecho de que, a semejanza de la especie humana, muchos de ellos se hallan inmersos en complejas redes sociales formadas por las relaciones que conectan a cada individuo con los compañeros del grupo.

CÓMO ESTUDIARLAS

La aplicación de ese enfoque comenzó en serio hace apenas quince años, cuando los etólogos empezaron a adoptar los métodos empleados por los sociólogos en el análisis de las redes sociales humanas, primero en el puesto de trabajo o en el vecindario, y después en comunidades virtuales como Facebook o Twitter. Las redes sociales animales varían desde simples asociaciones entabladas por un puñado de individuos, como los peces de un cardumen que nadan juntos, hasta configuraciones mucho más complejas, como las tropas de babuinos, cuyos individuos participan en múltiples tramas imbricadas (redes de apareamiento, de dominancia o de aseo) que influyen directa e indirectamente en los miembros del grupo. Las redes cambian con frecuencia: los animales se incorporan a ellas o las abandonan, o bien modifican su posición y conexiones como consecuencia de enfermedades, de la adquisición de conocimiento y de interacciones previas.

Tanto en las sociedades simples como en las complejas, las interacciones entre sus integrantes tienen implicaciones importantes para la supervivencia y la reproducción. La exactitud de la información sobre el alimento, los depredadores y las parejas, así como la rapidez con la que esta se transmite a través del grupo, depende de la estructura de la red social. Con quién se juega, se contiende o a quién se ayuda también depende de la estructura. Y las enfermedades y los parásitos se contagian de un individuo a otro sin que ambos hayan entrado en contacto, al propagarse el patógeno a través de intermediarios.

En los análisis generales suelen identificarse varios atributos específicos de las redes animales: los individuos clave (los dotados de numerosas conexiones y cuya desaparición altera la red), los nodos (cada uno de los individuos que forman parte de la red), la densidad de la red (el cociente entre el número de vínculos reales y posibles), el grado (el número de vínculos entre cada individuo y los demás), el alcance (el número de amigos que tienen los amigos de un individuo) y la centralidad (el porcentaje del total de conexiones en que aparece cierto individuo). Por ejemplo, la mayoría de los ciudadanos de EE.UU. exhiben una escasa centralidad en el conjunto del país, pero casi todos saben quién es el presidente y están vinculados a él a través de las autoridades locales, por lo que la centralidad de este ronda el cien por cien.

Para hacernos una idea de cómo operan las redes sociales en la naturaleza, y de cómo podrían representar el principal impulsor del comportamiento de todos sus integrantes, fijémonos en las vidas no tan privadas de tres especies que han sido estudiadas de ese modo.

VIGILANCIA DE LA RED

El macaco de cola de cerdo (*Macaca nemestrina*) crea múltiples redes, como las compuestas por los compañeros de juego o de aseo. El tamaño de estas varía, y un mono puede establecer amistades distintas en cada una de ellas. El papel de cada individuo puede ser más destacado en una red que en las

Lee Alan Dugatkin es profesor de biología en la Universidad de Louisville. Ha publicado 150 artículos y también libros de divulgación, como *Qué es el altruismo: La búsqueda científica del origen de la generosidad*.

Matthew Hasenjager es uno de los doctorandos del laboratorio de Dugatkin. Su tesis examina las redes sociales animales.

otras. Pero todas las redes comparten un rasgo común: operan bajo la mirada atenta de un puñado de figuras autoritarias que mantienen la paz. Estos macacos «policía», del más alto rango, dedican tiempo y esfuerzo a poner fin a las riñas entre los miembros de su red social.

Desde principios hasta mediados de los años 2000, Jessica Flack, del Instituto de Santa Fe, y sus colaboradores (entre ellos Frans de Waal, primatólogo de la Universidad Emory) estudiaron el papel de los policías en una manada de 84 macacos del Centro Nacional Yerkes para la Investigación de Primates, en Emory. Los genetistas suelen descifrar la función de un gen en una célula o en un ser vivo desactivándolo y observando las consecuencias. El equipo de Flack aplicó esta estrategia de supresión a los macacos y apartó del grupo a tres de los machos policías. A continuación, los investigadores aguardaron y observaron.

La pérdida de un miembro de bajo rango apenas modificó las redes sociales. Pero, como era previsible, la ausencia del policía dio lugar a un aumento de las agresiones y a un descenso de las reconciliaciones tras las riñas. Además, de modo inesperado, las redes de compañeros de juego y de aseo sufrieron una reestructuración profunda.

De esta manera, los miembros del grupo jugaban y se aseaban con menos compañeros; es decir, el grado de sus redes de juego y aseo disminuyó. Y el alcance de los monos (el número de amistades que entablaban los amigos de un individuo) descendió en esas redes. Al mismo tiempo, la cohesión de la sociedad entera se debilitó; la población sufrió una suerte de balcanización y acabó por segregarse en facciones pequeñas y homogéneas que raramente se relacionaban con los foráneos. Estas observaciones llevaron a Flack y sus colaboradores a plantear la hipótesis de que la presencia del policía propiciaba una red más dinámica y tupida, cuyos integrantes gozaban de contactos más numerosos y amistosos con un mayor número de congéneres.

Tal experimento de supresión, con su revelación de que ciertos individuos son especialmente valiosos para mantener la cohesión, sugiere que el conocimiento de las redes sociales animales podría resultar relevante en el ámbito de la conservación. Tomemos el ejemplo de las ballenas orcas (*Orcinus orca*). Las hembras jóvenes y los grupos de hembras emparentadas parecen conformar núcleos primordiales para la transmisión de información acerca de las fuentes de alimento y de otros aspectos de la vida en el mar. Cualquier actividad humana que perturbe a esos individuos o esos núcleos de información colectiva, como la caza, la contaminación marina o la construcción de barreras que impidan la libre circulación de los cetáceos en su medio, podría trastocar seriamente la red social de las orcas y debilitar las posibilidades de supervivencia del grupo. Cuando menos, este conocimiento podría servir para refinar las medidas destinadas a reducir el impacto de la actividad humana en estos animales fascinantes.

LA RED DE CANTO Y DANZA

El estudio de las redes sociales se ha centrado también en las poblaciones de aves silvestres. Una de ellas ha sido el saltarín colilargo de América Central (*Chiroxiphia linearis*). Los machos lucen un bello plumaje que destaca por sus alas índigo, un píleo rojo y, como su nombre indica, una fina y larga cola. Un observador que tope con el par adecuado de machos en el mismo posadero presenciará un recital de canto y danza. Las hembras, lógicamente, prestan gran atención y valoran la interpretación para escoger pareja. Para los machos, la oportunidad de participar en estos duetos reviste una enorme importancia. Por desgracia, la competencia es feroz y con frecuencia acaba en trifulca.

David McDonald, de la Universidad de Wyoming, pasó más de diez años en Costa Rica y dedicó 9288 horas a observar los pájaros. Mediante la aplicación de técnicas de análisis de las redes sociales, descubrió que los machos con un alto grado de conectividad en el pasado eran los que tenían el privilegio de actuar en esas sesiones espontáneas.

Como en cualquier concurso de canto o baile, el proceso resulta complejo. Grupos de 8 a 15 machos se congregan en zonas donde hay uno o varios posaderos en los que acabarán ejecutando su interpretación. Cualquier macho del grupo puede practicar el canto y la danza en un posadero fuera de la temporada de cría (desde finales de febrero hasta inicios de septiembre); y también en dicho período, siempre que no ronde cerca hembra alguna. Pero si en la temporada de cría una fémina se digna a aparecer, los dos machos dominantes (alfa y beta) reclaman su derecho a cantar y danzar. La pareja de pretendientes se alía para expulsar del escenario a los demás rivales. El macho alfa seduce a casi todas las hembras que



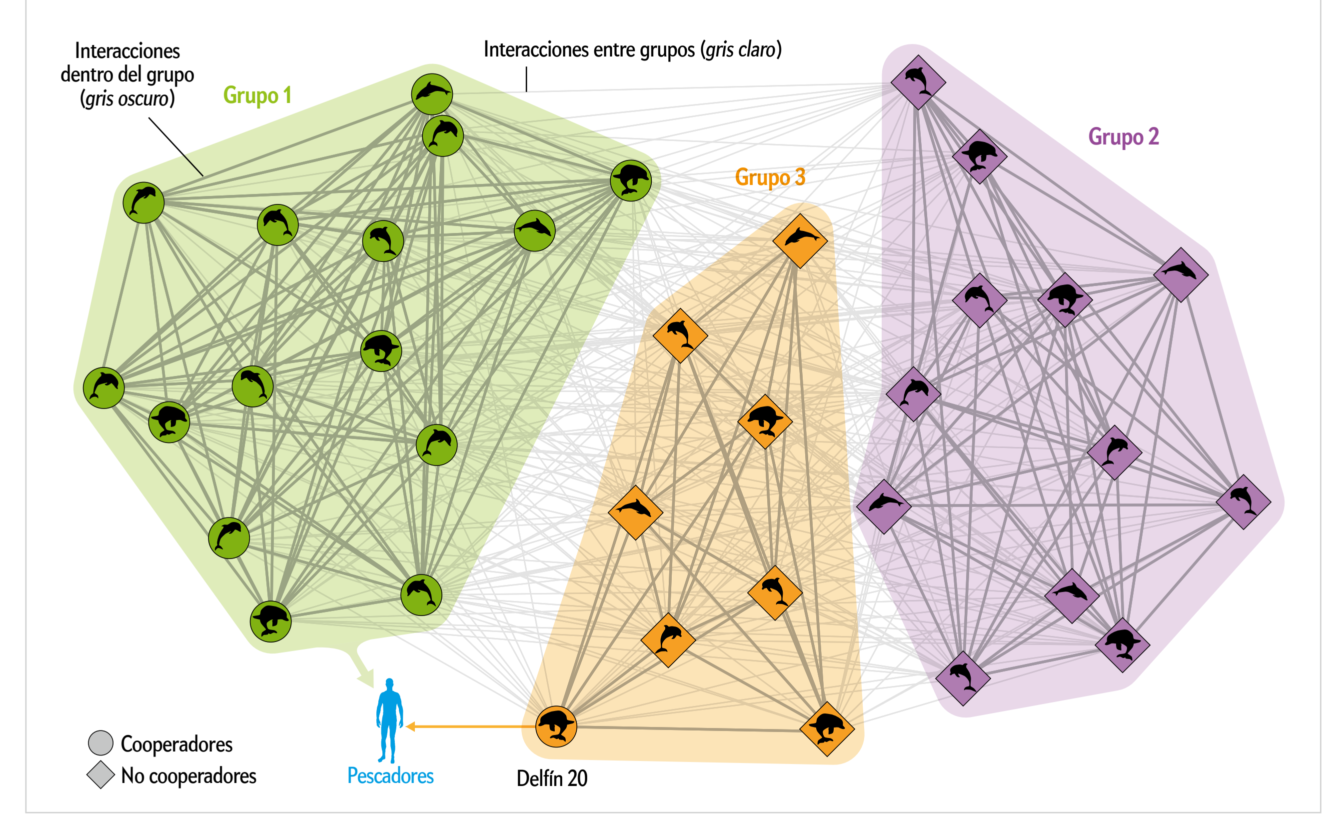


LA RED SOCIAL refuerza e influye en innumerables aspectos, como las posibilidades de apareamiento del saltarín colilargo (*izquierda*), el aseo de los macacos (*centro*) o la predisposición de algunos delfines mulares a cooperar con pescadores brasileños en la pesca de la lisa (*derecha*).

MARIE READ, SCIENCE SOURCE (*aves*); JOE MCDONALD, GETTY IMAGES (*monos*); STEPHEN FRINK, GETTY IMAGES (*delfines*)

Delfines y pescadores se alían para pescar

Los delfines de la región de Laguna, en el sur de Brasil, establecen una alianza singular con los pescadores artesanales de la zona para capturar lisas. En un estudio se comprobó que los cetáceos formaban tres grupos. Todos los miembros del grupo1 (*verde*) cooperaban con los pescadores (*indicado mediante círculos*) y mantenían una estrecha relación entre sí (*líneas que enlazan los individuos*). Los miembros del grupo 2 (*morado*) se relacionaban menos entre sí que los del grupo 1 y se mantenían alejados de los pescadores (*indicado mediante cuadrados*). Los integrantes del grupo 3 (*naranja*) tampoco mostraron interés por ellos, con la notable excepción de uno, el delfín «20» (*círculo naranja*). Este individuo ayudaba a los pescadores y actuaba como enlace con el grupo 1, y también habría enseñado al grupo 3 a cooperar con los humanos. Se sabe que la colaboración de los delfines con los pescadores mejora las capturas de ambas partes.



FUENTE: «THE STRUCTURE OF A BOTTLENOSE DOLPHIN SOCIETY IS COUPLED TO A UNIQUE FORAGING COOPERATION WITH ARTISANAL FISHERMEN», POR F. G. DAURA-JORGE ET AL. EN *BIOLOGY LETTERS*, VOL. 8, N.º 5, 23 DE OCTUBRE DE 2012; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

acuden al posadero. La compensación para el macho beta es el derecho de sucesión tras su muerte. Este sistema reporta un beneficio enorme para ambos, algo que todos los demás machos ansían pero pocos consiguen.

Como los machos jóvenes maduran entre el primer y el sexto año, a menudo se desplazan de una zona de posaderos a otra y entablan relación con muchos otros iguales. La media de edad de los machos reproductores ronda los diez años, lo que significa que cualquiera de ellos acaba conociendo a muchos otros rivales de su entorno a medida que madura. Durante su prolongado trabajo de campo, McDonald registró los machos que se relacionaban entre sí cada año. Con esos datos trazó un esquema de la red social para comprobar si su estructura revelaría los machos que acabarían formando un dueto interpretativo de éxito.

Sus parámetros tuvieron en cuenta tanto las conexiones cortas, que vinculan directamente un individuo con otro, como las indirectas, que pueden incluir relaciones entre aves situadas a varios eslabones del primer individuo («No conozco en persona a Juan, pero sí a Pedro, que conoce a José, y este a su vez a Juan»). McDonald acabó averiguando que el secreto del éxito residía en la centralidad: los machos centrales tenían muchas más posibilidades de ascender en el escalafón que los no tan bien conectados, y a veces alcanzaban la condición de macho alfa o beta, que les permitía subir al escenario para cantar, bailar y conquistar a las hembras.

En este punto conviene matizar que los estudios de ese tipo identifican las estructuras de la red y las vinculan con el comportamiento observado. La causalidad entre la estructura y el comportamiento se supone, pero no queda demostrada. También es razonable pensar que los machos alfa y beta han podido hacerse con el poder no gracias a sus numerosas conexiones, sino a ciertos atributos que les han permitido ganarse a sus iguales.

LA RED DE PESCA DEL DELFÍN

Como hemos dicho antes, muchas herramientas de la teoría de redes sociales son prestadas de las ciencias sociales. No es sorprendente, pues, que uno de los primeros protagonistas del análisis de redes animales fuera el delfín mular, una especie con un cerebro evolucionado, inteligente y sociable.

A finales de los años noventa, David Lusseau quedó fascinado por los delfines mulares (*Tursiops truncatus*) de Doubtful Sound, un bello fiordo del sur de Nueva Zelanda situado a casi 300 kilómetros de la Universidad de Otago, donde el investigador, ahora en la Universidad de Aberdeen, trabajaba en su tesis doctoral. Por espacio de siete años estudió esos maravillosos animales: una de sus herramientas era la fotografía, que le permitió identificar de modo sistemático las marcas naturales de los 64 delfines de Doubtful Sound y seguirlos mejor.

Después de observar más de mil grupos de tamaño diverso formados por alguno de esos 64 animales, Lusseau llegó a la conclusión de que los delfines formaban parte de una gran red social que vinculaba a casi todos. Además, comprobó que cada uno prefería ciertas compañías. Sin embargo, no pudo averiguar exactamente por qué. ¿Qué oportunidades ofrecía la red a los delfines y de qué modo compartían la información o los beneficios?

Para profundizar en esas cuestiones, Lusseau aunó fuerzas con Paulo C. Simões-Lopes, del Laboratorio de Mamíferos Acuáticos de la Universidad Federal de Santa Catarina en Brasil. Juntos estudiaron una población de 55 delfines mulares que vivía en las antípodas y que hacía gala de una conducta singular, descubierta por Simões-Lopes pocos años antes. Los animales establecían una relación mutualista con los pescadores artesanales del lugar.

Cada primavera, entre abril y junio, los pescadores de la región brasileña de Laguna emplean un arte de pesca traído por los colonos de las islas Azores hace más de doscientos años. Calan largas redes para capturar los bancos de lisas (*Mugil platanus*) que migran desde las frías aguas argentinas. En los últimos años han contado con una ayuda inaudita: algunos de los delfines mulares de las lagunas dirigen los bancos de lisas hacia las redes. En el momento oportuno, chapotean con la cabeza y la cola indicando a los pescadores el momento y el lugar donde lanzar la red. El resultado de esta colaboración extraordinaria es que ambas partes atrapan más peces de lo que conseguirían solas.

La experiencia de Lusseau le hizo pensar en el análisis de las redes sociales como medio para estudiar en profundidad ese comportamiento excepcional. Entre los meses de septiembre de 2007 y de 2009, él, Simões-Lopes y otros colaboradores navegaron en barca por las lagunas con fotografías en mano de los delfines para recabar datos sobre los individuos que nadaban juntos. El equipo recopiló información sobre 35 de los 55 integrantes de la población. Pese a no ser completos, los resultados hicieron patente que los delfines habían creado una red social muy organizada.

El análisis estadístico reveló que los delfines de Laguna podían dividirse en tres grupos en virtud del tiempo que permanecían juntos. Aunque todos los individuos de un grupo dado se relacionaban con los de los demás grupos, los integrantes de este solían nadar juntos y relacionarse sobre todo entre sí. Esa estrecha asociación facilitaría la transmisión de la información entre los miembros.

El grupo 1 estaba formado por 15 delfines y todos cooperaban con los pescadores. Estaba estrechamente interconectado: todos sus componentes se relacionaban entre sí con frecuencia, tanto en la temporada de pesca de la lisa en otoño como el resto del año. La información fluía con facilidad. No es sorprendente que tal grupo se beneficiara de su relación con los pescadores, mientras que los demás dejaron escapar la oportunidad.

Los grupos 2 y 3 eran muy diferentes del grupo 1. Ninguno de los doce delfines que formaban el grupo 2 cooperaba con los pescadores. Y aunque sus miembros solían confraternizar entre sí, tanto en la temporada de pesca como fuera de ella, sus relaciones sociales no eran tan ricas como las del grupo 1.

De los ocho integrantes del grupo 3, siete no cooperaban con los pescadores, excepto uno, el número 20. Este individuo, además, dedicaba más tiempo que ningún otro a congeniar con los demás grupos. Al parecer, actuaba como enlace entre los grupos 1 y 3. Determinar la influencia de esos individuos de enlace en las redes de gran complejidad será un campo fértil para estudios futuros. Los datos disponibles ya indican, empero, que en una red cohesionada como la del grupo 1, tales sujetos ayudan a sus miembros a superar dificultades que no pueden resolver solos; en este caso, concebir un modo de comunicación con otra especie: los pescadores humanos.

Todavía no sabemos si algunos individuos clave del grupo 1 (tal vez los más viejos y experimentados) enseñan a sus compañeros de grupo a cooperar con los pescadores. Pero dado que la enseñanza también está presente en otros comportamientos alimentarios complejos de esta especie, no sería sorprendente hallar un proceso de instrucción similar en este caso. De hecho, esas tradiciones aprendidas socialmente forman la base de la cultura animal y se ven facilitadas en gran medida por las redes sociales.

La actitud hacia los animales ha cambiado mucho desde que se los considerara «autómatas sin cerebro», simples ejecutores de programas genéticos. Los etólogos saben ahora que muchos animales son más inteligentes, tienen una conducta más flexible y están más capacitados para aprender de lo que los pioneros de la disciplina pudieron imaginar. Auguramos que el creciente número de estudios sobre las redes sociales y la difusión de sus resultados cambiarán aún más nuestro modo de verlos. En absoluto autómatas programados, la vida de muchos animales transcurre inmersa, a semejanza de la nuestra, en un entorno social complejo: redes donde las interacciones directas e indirectas con los semejantes determinan lo que es trascendente para la supervivencia y el éxito.

PARA SABER MÁS

The omnivorous chimpanzee. Geza Teleki en *Scientific American*, págs. 32-42, enero de 1973.
Policing stabilizes construction of social niches in primates. Jessica C. Flack et al. en *Nature*, vol. 439, págs. 426-429, 26 de enero de 2006.
The structure of a bottlenose dolphin society is coupled to a unique foraging cooperation with artisanal fishermen. F. G. Daura-Jorge et al. en *Biology Letters*, vol. 8, n.º 5, págs. 702-705, 23 de octubre de 2012.
Herd composition, kinship and fission-fusion social dynamics among wild giraffe. Fred B. Bercovitch y Philip S. M. Berry en *African Journal of Ecology*, vol. 51, n.º 2, págs. 206-216, junio de 2013.
Structure of male cooperation networks at long-tailed manakin leks. Andrew J. Edelman y David B. McDonald en *Animal Behavior*, vol. 97, págs. 125-133, noviembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Toma de decisiones en enjambres. Thomas D. Seeley, P. Kirk Visscher y Kevin M. Passino en *IyC*, septiembre de 2006.
¿Por qué cooperamos? Martin A. Nowak en *IyC*, octubre de 2012.
El arte de construir un nido. Guy Théraulaz, Pascale Perna y Andrea Kuntz en *IyC*, octubre de 2012.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto para Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

Quemaduras en la hierba

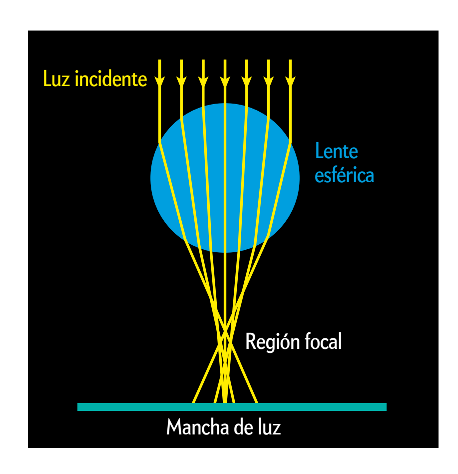
Ponemos a prueba una vieja regla de la jardinería: ¿se queman las hojas de las plantas cuando se riega a plena luz del sol?

¿Quién no ha sentido lástima al ver languidecer las plantas de su jardín en un caluroso mediodía de verano? Aunque un primer impulso nos lleva a tomar la manguera, una regla de jardinería muy extendida nos dice que nunca hemos de regar las plantas a pleno sol. En un principio, la advertencia parece razonable: si finalmente nos decidimos a regar, veremos que, en el centro de la sombra que proyectan las gotas de agua que quedan esparcidas sobre las hojas, aparecen unas manchas de luz brillantes.

¿Basta su intensidad para provocar quemaduras? Según las leyes de la óptica geométrica, la luz que incide en una gota se refractará al traspasar las superficies de contacto entre el aire y el agua. La forma de las gotas hace que estas funcionen como una lente convergente: los rayos salientes se juntarán, se cruzarán en una región estrecha y luego se separarán de nuevo.

Ahora imaginemos que colocamos un obstáculo en el camino de la luz. Cuanto más cerca se encuentre este de la zona en que se cruzan los rayos, mayor será la intensidad de la luz sobre su superficie. Podemos hacernos una idea del efecto si tomamos una pequeña bola de vidrio de 12 milímetros de diámetro y la situamos sobre una hoja de papel. La mancha de luz presentará un diámetro de unos 2,4 milímetros. Eso quiere decir que la luz incidente ha quedado concentrada en una superficie cuyo diámetro es un quinto del de la bola. Dado que la relación entre diámetro y superficie es cuadrática, la densidad de energía depositada sobre la mancha será 25 veces mayor que si la luz hubiese incidido directamente sobre el papel.

Ahora supongamos que una hoja de papel expuesta al sol aumenta su temperatura en unos 20 grados Celsius. Como el incremento de temperatura resulta proporcional a la energía absorbida, bajo una bola de vidrio experimentaremos un aumento de temperatura de unos $25 \times 20 = 500$ grados. El papel de máquina de escribir empieza a arder a 360 grados, por lo que nuestro experimento bastará para iniciar la combustión. Y, de hecho, si esperamos unos pocos minutos, veremos que sobre la hoja comienzan a aparecer inequívocas manchas de quemaduras.



UNA LENTE CONVERGENTE concentra un haz de rayos paralelos en una región focal estrecha (un punto, en el caso ideal). Al situar una superficie detrás de la lente, el tamaño de la mancha de luz dependerá de la distancia entre la superficie y la región focal.



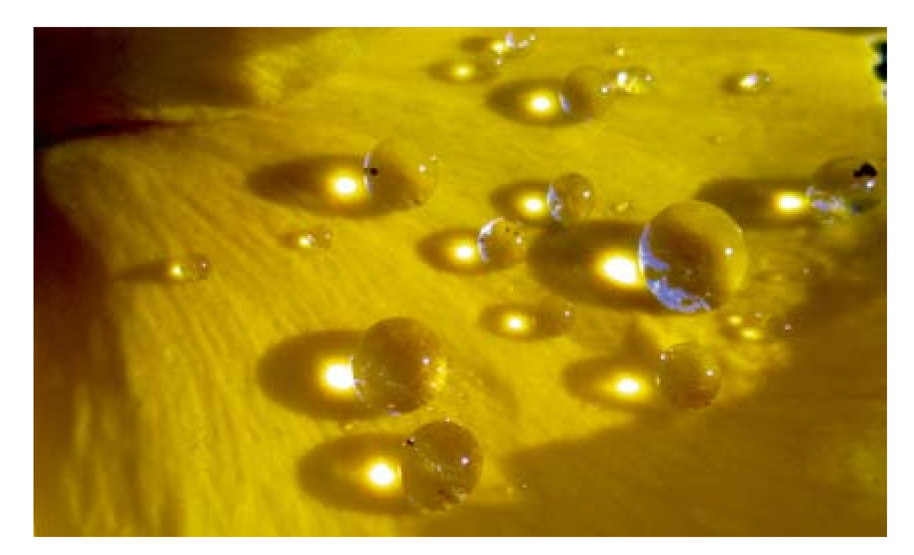


UNA BOLA DE VIDRIO concentra la luz del sol sobre una superficie. La posición de la mancha brillante depende, entre otros factores, de si el sol se encuentra más alto (*izquierda*) o en una posición más baja (*derecha*).

¿Opondrá mayor resistencia la hoja rebosante de savia de una planta? El experimento adecuado muestra que todo es cuestión de paciencia: basta con esperar un tiempo unas tres veces mayor que en el caso del papel para comprobar que nuestra hoja comienza a oscurecerse.

A la experiencia con la bola de cristal podemos objetar que el agua presenta un índice de refracción menor que el vidrio ($n = 1{,}33$ para el agua, mientras que el de un vidrio típico asciende a $n = 1{,}5$). Sin embargo, esta diferencia solo hace que los rayos de luz que abandonan el cristal

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN EL AUTOR (*lente convergente*); H. J. SCHLICHTING (*fotografías*)



A LA LUZ DEL SOL, las gotas esféricas depositadas sobre una hoja proyectan una sombra en cuyo centro puede observarse una mancha de luz brillante. La fotografía muestra un pétalo de pensamiento poco después de caer la lluvia.



EN UNA GOTA LENTICULAR, la mancha de luz suele encontrarse dentro de la región en que el agua hace contacto con la hoja. Cuando eso ocurre, la acción refrigerante del agua previene la aparición de quemaduras.

converjan más rápido hacia la región focal (donde se formaría la mancha de luz de menor diámetro; un punto, en el caso ideal). Es decir, la zona en que los rayos de luz se concentran con mayor intensidad estará algo más alejada de una gota de agua que de una bola de vidrio. Sin embargo, no podemos decir en qué caso la luz se concentrará con mayor intensidad, ya que dicha cuestión depende, sobre todo, de los detalles geométricos de la lente y del ángulo que subtienden la hoja y los rayos de luz (y, por tanto, también de la hora del día e incluso de la latitud geográfica).

Refrigeración eficaz

Para que se formen gotas de agua sobre la superficie de una hoja, esta debe ser hidrófoba, al menos hasta cierto punto. Por regla general así ocurre. Las plantas respiran a través de los estomas, pequeños poros situados en la superficie de las hojas. Por lo que, si en lugar de formar gotas, el agua se esparciese de manera uniforme sobre la hoja, dichos orificios se encharcarían y no podrían cumplir su función.

Sin embargo, sobre la mayoría de las plantas las gotas adoptan la forma de una pequeña lente achatada. La superficie de contacto entre el agua y la hoja suele presentar un tamaño considerable, de modo que la mancha de luz se encuentra casi siempre en el interior de dicha superficie. Como consecuencia, el agua, debido a su gran capacidad calorífica, logra refrigerar la hoja con gran eficacia. Pero incluso esto resulta muchas veces innecesario. La mancha de luz que genera una gota con forma de lente es, por lo general, bastante ancha, ya que la región focal suele quedar muy por detrás de la hoja. Por tanto, el aumento de temperatura resultante es ínfimo.

No sucede lo mismo con aquellas hojas que presentan un grado de impermeabilidad muy elevado. En ellas, unas minúsculas vellosidades impiden que el agua toque la superficie. El borde de la gota hace contacto sobre todo con el aire, lo que, por razones energéticas, otorga a la gota una geometría esférica, tanto más perfecta cuanto menor es. En tales casos, el agua no puede refrigerar la hoja, por lo que el efecto de lente sí puede calentarla.

El fenómeno ha llegado a concitar el interés de los científicos. En 2010, tras varias investigaciones teóricas y experimentales, Ádám Egri, de la Universidad Eötvös Loránd de Budapest, y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que las gotas caídas sobre hojas lisas no podían dañar el tejido. Solo en el caso de hojas con una elevada impermeabilidad, como las de las salvinias, se producen quemaduras. Los investigadores incluso trasladaron sus resultados a la piel humana. Según concluyeron, bajo ciertas condiciones «ideales», las gotas de agua que permanecen sobre el vello corporal después de bañarnos también podrían, en principio, causar quemaduras.

¿Qué lección podemos extraer de la vieja regla de jardinería? Si contemplamos nuestro jardín minutos después de que haya llovido y salido el sol, veremos sobre todo plantas secas, lo que revela una patente hidrofobia. Si las pocas gotas restantes no adoptan una forma esférica, no tendremos de qué preocuparnos. Con todo, sí deberíamos observar la siguiente regla: si el agua de riego contiene minerales añadidos a modo de abono, estos permanecerán en las hojas aun cuando el agua se haya evaporado. En tal caso, tendremos que prevenir una «quemadura» química, en lugar de térmica.

PARA SABER MÁS

Optics of sunlit water drops on leaves: Conditions under which sunburn is possible. Á. Egri et. al. en *New Phytologist*, vol. 185, págs 979-987, marzo de 2010.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



El problema de la bella durmiente

¿Cómo creer tras perder la noción del tiempo?

Yo creo muchas cosas. Creo, por ejemplo, que mañana va a salir el sol. Creo también que mañana no va a nevar. Sin embargo, estoy mucho más seguro de que mañana saldrá el sol de que no nevará. Mi nivel de creencia en el primer enunciado es mayor que mi nivel de creencia en el segundo.

Uno de los supuestos fundamentales de la teoría de la decisión racional establece que los niveles de creencia satisfacen los axiomas de la teoría de la probabilidad. Es decir, que pueden medirse con números reales entre 0 y 1, y que:

- Si sabemos que E es un evento inevitable, nuestro nivel de creencia en E será 1.
- Si sabemos que E y F son eventos incompatibles, nuestro nivel de creencia en que uno de ellos ocurrirá vendrá dado por la suma de nuestros niveles de creencia en E y en F.

Si estamos seguros de que la probabilidad de que ocurra E es n, nuestro nivel de creencia en E será n. Y, en general, nuestro nivel de creencia en E será igual a nuestra estimación de la probabilidad de E.

Supongamos ahora que ayer lancé una moneda. El resultado fue cara o cruz, pero la verdad es que no lo recuerdo. ¿Cuál es la probabilidad de que cayese cara?

Hablar de probabilidades en este contexto resulta algo extraño, ya que, aunque la ignoremos, existe una respuesta correcta a la pregunta de si la moneda cayó cara o cruz (nótese el contraste con la misma pregunta si hablásemos de un lanzamiento que tendrá lugar mañana). Sin embargo, parece más que razonable asignar un nivel de creencia de 1/2 a la posibilidad de que la moneda cayese cara.

Otro supuesto de la teoría de la decisión racional nos dice que, si nuestro nivel de creencia viene dado por una función de probabilidad P, y si aprendemos que un evento cualquiera E ha ocurrido, nuestro nivel de creencia en un suceso arbitrario X habrá de ser igual a la probabilidad de X dado E; es decir, a $P(X|E)$.

El experimento

Le han invitado a participar en un experimento y usted ha decidido aceptar. La prueba comenzará un domingo. Ese día habrá de trasladarse al laboratorio, donde permanecerá hasta el miércoles por la mañana. Al llegar, le proporcionan los detalles del experimento:

Bienvenido a nuestro laboratorio, y gracias de antemano por participar. Cuando lea esta carta serán las ocho de la tarde del domingo. A las nueve le daremos un potente somnífero que le hará dormir durante tres días seguidos, a menos que le despertemos antes. Dado que el experimento concluirá el martes, le despertaremos el miércoles por la mañana.

Durante esos tres días le despertaremos una o dos veces, dependiendo de cuál sea el resultado de una moneda que lanzaremos mientras duerme. Pase lo que pase le despertaremos brevemente el lunes. Después, si la moneda cae cara, le dejaremos dormir hasta el miércoles por la mañana. Si cae cruz, le despertaremos una vez más el martes. Pero no se preocupe: cada vez que le despertemos antes del miércoles le daremos otro somnífero para asegurarnos de que continúa durmiendo. Por desgracia, esta pastilla tiene un pequeño efecto secundario: cuando despierte, no recordará la vez anterior que le despertamos.

Disfrute su merecido descanso, y gracias de nuevo por su colaboración.

El lunes le despertarán sin decirle qué día es. ¿Cuál debería ser su nivel de creencia en que la moneda cayó —o caerá— cara?

¡Qué pregunta tan tonta!

Entendería si me dijese que la respuesta es evidente. El domingo sabía que el experimento se llevaría a cabo con una moneda corriente, por lo que la probabilidad de que esta cayese cara era igual a 1/2. Por ende, su nivel de creencia en el evento CARA era 1/2. Al despertarse el lunes no aprende nada nuevo (ya sabía de antemano que le iban a despertar por lo menos una vez), por lo que su nivel de creencia en el evento CARA debería ser el mismo: 1/2.

Nótese que no hemos dicho nada sobre cuándo tendrá lugar el lanzamiento de moneda. Los investigadores podrían lanzarla antes o después de despertarle el lunes por la mañana. Pero no ganamos mucho empeñándonos en una de las dos posibilidades. Para nuestros propósitos, podemos suponer que la moneda será lanzada el lunes por la tarde. Da igual. Puede comprobar que el problema que expondremos a continuación también aparece si la moneda se lanza antes de que le despierten por primera vez.

Cuando le despierten el lunes no sabrá si es lunes o martes, por lo que ignorará si la moneda ya ha sido lanzada. En cualquier caso, aprender que el lanzamiento de moneda ya tuvo lugar no debería afectar a su nivel de creencia en el evento CARA. Si quiere verlo así, imagine que se encuentra en una habitación con los ojos vendados y que le dicen que alguien va a lanzar una moneda. Su nivel de creencia en que la moneda caerá cara será igual a 1/2. Pasado el rato, le aseguran que la moneda ya ha sido lanzada. Al no haber visto el resultado, su nivel de creencia en que cayó cara también debería ser igual a 1/2.

Por otro lado...

Al despertarse el lunes por la mañana sabe que hay tres posibilidades compatibles con sus indicios:

- CARA_L: Es lunes y la moneda caerá cara.
- CRUZ_L: Es lunes y la moneda caerá cruz.
- CRUZ_M: Es martes y la moneda cayó cruz.

La cuarta posibilidad (es martes y la moneda cayó cara) es incompatible con las condiciones del experimento.



THINKSTOCKPHOTOS/SHIBANUK

Ahora bien, ninguna de esas tres posibilidades parece más o menos probable que otra, de modo que su nivel de creencia en cualquiera de ellas debería ser el mismo; a saber, 1/3. En particular, su nivel de creencia en CARA_L debería ser 1/3.

Sin embargo, el evento CARA solo resulta compatible con la posibilidad de que sea lunes. De modo que sabe que CARA_L es verdadero si y solo si CARA es verdadero. Y, en general, si sabemos que un evento cualquiera A es verdadero si y solo si B lo es, nuestro nivel de creencia en A tiene que ser el mismo que en B. (Esto último resulta interesante per se, pero puede comprobarse que se sigue del supuesto de que los niveles de creencia satisfacen los axiomas de la teoría de la probabilidad.) Por tanto, su nivel de creencia en CARA debería ser igual a su nivel de creencia en CARA_L; es decir, 1/3.

La función de probabilidad

Algo falla: uno de los dos razonamientos anteriores ha de ser incorrecto. Consideremos la situación con un poco más de cuidado e intentemos localizar el error.

Llamemos P a la función de probabilidad que corresponde a sus niveles de creencia al despertarse el lunes. En ese momento sabe que el evento $\text{CARA}_L \vee \text{CRUZ}_L \vee \text{CRUZ}_M$ es inevitable. Además, los miembros de esta disyunción resultan incompatibles dos a dos, por lo que a partir de los axiomas de la teoría de la probabilidad tenemos que:

$$(1)\quad P(\text{CARA}_L) + P(\text{CRUZ}_L) + P(\text{CRUZ}_M) = 1\ .$$

Por otro lado, sabe también que si, de algún modo (no importa cómo), aprendiese que la moneda cayó o caerá cruz, su nivel de creencia en un evento E cualquiera tendría que venir dado por la probabilidad $P(E\,|\,\text{CRUZ}_L \vee \text{CRUZ}_M)$.

Pero, si aprendiese que la moneda cayó o caerá cruz, su nivel de creencia en CRUZ_L y CRUZ_M debería ser el mismo, ya que ambas posibilidades son simétricas. De modo que, sea cual sea la función de probabilidad P, esta ha de satisfacer la siguiente propiedad:

$$P(\text{CRUZ}_L\,|\,\text{CRUZ}_L \vee \text{CRUZ}_M) = P(\text{CRUZ}_M\,|\,\text{CRUZ}_L \vee \text{CRUZ}_M)\ .$$

Ahora bien, si dos eventos A y B son incompatibles, y si $P(A\,|\,A\vee B) = P(B\,|\,A\vee B)$, entonces $P(A) = P(B)$. Para ver por qué, recordemos que, para dos eventos cualesquiera X e Y con $P(Y) \neq 0$:

$$P(X\,|\,Y) = \frac{P(X\ \&\ Y)}{P(Y)}\ .$$

Así pues, si $P(A\,|\,A \vee B) = P(B\,|\,A \vee B)$, tendremos que:

$$\frac{P(A\ \&\ (A\vee B))}{P(A\vee B)} = \frac{P(B\ \&\ (A\vee B))}{P(A\vee B)}\ .$$

Y, dado que $P(A) = P(A\ \&\ (A \vee B))$ y $P(B) = P(B\ \&\ (A \vee B))$, tenemos que $P(A) = P(B)$. De modo que podemos concluir que:

$$(2)\qquad P(\text{CRUZ}_L) = P(\text{CRUZ}_M)\ .$$

Llegados aquí merece la pena puntualizar lo siguiente: aunque es cierto que hemos partido del supuesto de que aprenderemos que la moneda cayó o caerá cruz, la conclusión (2) resulta independiente de dicha premisa. En otras palabras, hemos comenzado considerando las propiedades formales de una serie de probabilidades condicionadas del tipo $P(E\,|\,\text{CRUZ}_L \vee \text{CRUZ}_M)$ para, a partir de ellas, derivar algunas características intrínsecas de $P(E)$.

Supongamos ahora que, cinco minutos después de despertarle el lunes, le dicen que es lunes. En ese momento, su nivel de creencia en CARA_L debería ser el mismo que su nivel de creencia en que la moneda caerá cara. De igual modo, su nivel de creencia en CRUZ_L debería ser idéntico a su nivel de creencia en que la moneda caerá cruz. Pero, dado que ha aprendido que es lunes, sabe que la moneda no ha sido

lanzada. Por tanto, su nivel de creencia en CARA y CRUZ debería ser 1/2. Así pues:

$$P(\textsc{cara}_L \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) = P(\textsc{cara} \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) = 1/2$$

y

$$P(\textsc{cruz}_L \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) = P(\textsc{cruz} \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) = 1/2 \,.$$

En consecuencia:

$$P(\textsc{cara}_L \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) = P(\textsc{cruz}_L \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) \,.$$

Empleando el mismo razonamiento que en el caso anterior, podemos concluir que:

(3) $$P(\textsc{cara}_L) = P(\textsc{cruz}_L).$$

Al igual que antes, (3) nos indica una propiedad intrínseca de nuestra función de probabilidad, una que resulta independiente del hecho de saber si es lunes o no.

Pero ahora se sigue de (1), (2) y (3) que su nivel de creencia en cada uno de los eventos $\textsc{cara}_L$, $\textsc{cruz}_L$ y $\textsc{cruz}_M$ ha de ser 1/3. Y, puesto que su nivel de creencia en $\textsc{cara}_L$ al despertarse el lunes (recuerde, antes de que le digan qué día es) ha de ser igual a su nivel de creencia en CARA, hemos de concluir que su nivel de creencia en CARA ha de ser 1/3.

Lo que resulta sorprendente es que, el domingo, su nivel de creencia en CARA era 1/2. Al despertarse el lunes no ha aprendido nada nuevo (al menos, nada que parezca pertinente para evaluar el resultado de una moneda que será lanzada el lunes por la tarde). Sin embargo, disponemos de un argumento que nos indica que su nivel de creencia en CARA debería cambiar al despertarse el lunes.

¿Qué nos queda?

Recordemos que P corresponde a la función que representa sus niveles de creencia al despertarse el lunes por la mañana. Parece claro que si aceptamos que:

(4) $$P(\textsc{cruz}_L \mid \textsc{cruz}_L \vee \textsc{cruz}_M) = P(\textsc{cruz}_M \mid \textsc{cruz}_L \vee \textsc{cruz}_M)$$

y

(5) $$P(\textsc{cara}_L \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) = P(\textsc{cruz}_L \mid \textsc{cara}_L \vee \textsc{cruz}_L) \,,$$

podemos establecer (2) y (3). Y, dado que (1) resulta indiscutible, tenemos un argumento impecable que sugiere que, al despertarse el lunes por la mañana, su nivel de creencia en CARA debería ser 1/3.

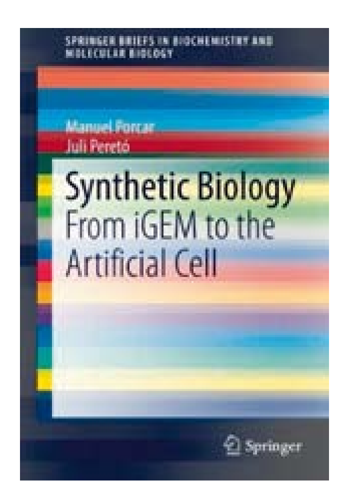
Así pues, parece imposible mantener que $P(\textsc{cara}) = 1/2$ una vez dados (4) y (5). De manera que, si el argumento que nos llevó a concluir que $P(\textsc{cara}) = 1/2$ es correcto, tiene que haber un error en el razonamiento en favor de (4) o en favor de (5). En caso contrario, tiene que haber un fallo en el razonamiento que nos llevó a concluir que $P(\textsc{cara}) = 1/2$.

El problema que acabamos de plantear se conoce hoy con el nombre de «problema de la bella durmiente». Los investigadores están divididos sobre cuál es la respuesta correcta. Parece que la mayoría de quienes escriben sobre él defienden que la solución es $P(\textsc{cara}) = 1/3$, aunque un número nada despreciable de autores sostienen que $P(\textsc{cara}) = 1/2$. ¿Dónde está el error?

PARA SABER MÁS

Un problema similar al expuesto aquí puede encontrarse en **On the interpretation of decision problems with imperfect recall**, por M. Piccione y A. Rubinstein en *Games and Economic Behavior*, vol. 20, págs. 3-24, 1997.

Nuestra versión aparece por primera vez en **Self-locating belief and the sleeping beauty problem**, por A. Elga en *Analysis*, vol. 60, n.º 2, 2000. Una discusión reciente e interesante es **Ten reasons to care about the sleeping beauty problem**, por M. Titelbaum en *Philosophy Compass*, vol. 8, n.º 11, 2013.



SYNTHETIC BIOLOGY. FROM IGEM TO THE ARTIFICIAL CELL

Por M. Porcar y J. Peretó. Colección «Springer briefs in biochemistry and molecular biology». Springer Verlag, Londres, 2014.

Un paseo por el lado sintético de la vida

La ciencia compite con la evolución en la creación de nuevas formas de vida

El libro nos introduce en el fascinante mundo de la biología sintética. Mediante esta obra, los autores, Manuel Porcar y Juli Peretó, nos invitan a visitar el pasado, presente y futuro de una nueva forma de entender la biología y la vida.

En el primer capítulo se aborda la cuestión fundamental relativa a qué es la biología sintética. Se trata de una nueva disciplina que persigue como objetivo fundamental «el uso de sistemas biológicos, organismos vivos o derivados con el fin de producir productos de uso especifico», como la síntesis de antibióticos o la producción de combustibles. Estos objetivos no son nuevos en sí mismos. Desde que el hombre habita el planeta ha moldeado el entorno que lo rodea para satisfacer sus necesidades de forma cada vez más eficiente. Mediante una selección controlada, ha dirigido la evolución para conseguir vacas que produzcan más leche, caballos más veloces o cultivos más resistentes.

La biología sintética se plantea conseguir esos objetivos de una forma radicalmente diferente, ganando en eficiencia y rapidez. Persigue diseñar de una forma racional los sistemas biológicos u organismos vivos que se necesitan y, literalmente, construirlos. Es, por tanto, una aproximación más propia de la ingeniería, la cual, mediante la combinación de distintas piezas (genes, organismos, etcétera) y siguiendo un diseño previo, consigue el objetivo deseado. Básicamente, se puede decir que la biología sintética prescinde de la evolución como mecanismo fundamental para la creación de nuevas formas de vida, reemplazándola por el diseño racional. Para que todo ello funcione, es necesario satisfacer los tres requisitos esenciales de todo desarrollo ingenieril: abstracción, estandarización y modularidad.

Pero la biología sintética va más allá. Podemos decir que constituye un cruce de caminos donde confluyen diferentes disciplinas, como la ingeniería, la modelización computacional, la biología molecular y la química orgánica, que nos permite no solo poner la biología al servicio del hombre, sino también abordar cuestiones de carácter trascendente, como el origen de la vida y los posibles caminos para la creación de vida artificial.

Pero ¿puede la biología sintética reducirse a una disciplina ingenieril más, donde, mediante el ensamblaje correcto de las piezas adecuadas se consigue el dispositivo final, como ocurre en otras disciplinas como la electrónica? Por desgracia, pero también de manera fascinante, la respuesta es no. El uso de componentes propios de la vida, como los genes, las proteínas, etcétera, introduce ciertas singularidades. Cuando se trabaja en la construcción de sistemas vivos, una de las características más significativas es la emergencia de nuevas propiedades que no pueden ser explicadas por la contribución de cada una de las partes que conforman el nuevo sistema creado. El todo no puede explicarse simplemente como la suma de las partes. Esto, que es una característica fundamental para el triunfo de la vida sobre nuestro planeta, al introducir la capacidad de cambio (por ejemplo, mediante mutaciones) sobre el diseño original para adaptarse a nuevas necesidades que puedan surgir, representa un grave obstáculo para la biología sintética, que persigue la creación de sistemas biológicos fiables y predecibles, que siempre respondan de la misma forma.

Con todo, el concepto de biología sintética no es nuevo ni reciente. En el segundo capítulo de esta obra se revisitan las ideas que sobre la creación de nuevas formas de vida y sobre biología sintética se formularon ya hace más de un siglo. Estas «antiguas» ideas son totalmente vigentes en la actualidad. La diferencia entre nuestro tiempo y el siglo anterior reside en la capacidad técnica.

Por primera vez en la historia, el hombre tiene la capacidad de manipular directamente el ADN, lo que nos permite crear nuevas formas de vida prescindiendo del lento mecanismo evolutivo de la selección. Ahora, para crear un nuevo organismo no es necesario seleccionarlo en un proceso iterativo-evolutivo, sino que directamente se puede diseñar y construir de un modo semejante al de otras máquinas complejas que el hombre ha creado. Sin embargo, hay que ser conscientes de que nos hallamos en los inicios de esta nueva era. En palabras de Luis Serrano, director del Centro de Regulación Genómica, nuestra situación es equiparable a la de los hermanos Wright, pioneros de la aviación, a principios del siglo xx, cuando se dedicaban a unir trozos de papel y madera para construir los primeros aviones.

Ante el reto de crear nuevas formas de vida podemos plantear dos estrategias (presentadas en el capítulo 4): la aproximación arriba-abajo (*top-down*) y la contraria, abajo-arriba (*bottom-up*). La primera se plantea la creación de nuevos organismos a partir de la combinación de diversas partes o piezas procedentes del genoma de otros organismos, lo que los autores denominan «a lo Frankenstein». La segunda, totalmente opuesta, sería «a lo Werker». La idea fundamental reside en conseguir que la combinación de un conjunto mínimo de elementos orgánicos, pero no vivos, den lugar a una entidad que presente las características fundamentales de la vida, es decir, la capacidad de automantenerse, de replicarse y, en el mejor de los casos, de evolucionar. Estas estructuras mínimas, que podemos considerar vivas pero que han sido creadas en el laboratorio a partir de la combinación de elementos no vivos, es lo que conocemos como protocélulas.

Mientras que la segunda estrategia (abajo-arriba) representa un mayor desafío desde el punto de vista conceptual —obliga a ahondar en cuestiones como qué es y cómo se configura la vida—, la primera (arriba-abajo) permite el desarrollo de sistemas vivos sintéticos cada vez más complejos.

Actualmente, las aplicaciones de la biología sintética en ámbitos como el de-

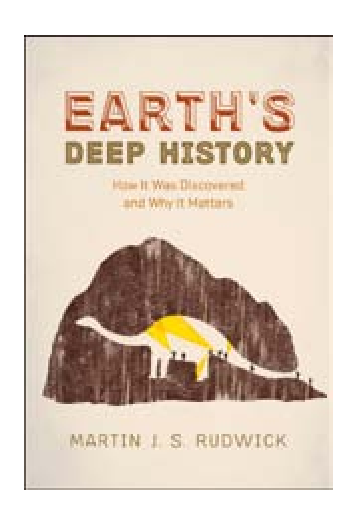
sarrollo de biocombustibles, la creación de circuitos celulares capaces de realizar tareas complejas o el tratamiento de ciertas enfermedades comienzan a ser una realidad.

El libro de Porcar y Peretó dedica, asimismo, una especial atención a una interesante iniciativa que en los últimos años ha alcanzado una gran difusión: el Concurso Internacional de Máquinas Diseñadas Genéticamente (iGEM, por sus siglas en inglés). Bajo los auspicios del Instituto de Tecnología de Massachusetts, la competición pretende promover el avance de la biología sintética, y lo hace a través de una convocatoria dirigida a estudiantes de todo el mundo. Durante las vacaciones académicas, y cargados de entusiasmo, miles de estudiantes trabajan en el desarrollo de dispositivos biológicos basados en propuestas científicas ingeniosas, capaces de hacer cosas interesantes, complejas o simplemente originales. Células que pueden producir electricidad, localizar minas antipersona enterradas en el subsuelo o detectar ciertas enfermedades son algunos ejemplos de los proyectos presentados a lo largo de los años en el marco de esta competición. Cabe destacar que los autores de este libro han sido, durante los últimos cinco años, los supervisores del equipo iGEM de la Universidad de Valencia.

Para la creación de estas «máquinas» vivas es necesaria la combinación de múltiples disciplinas: ingeniería para el diseño, matemáticas y simulación computacional para la modelización, y biología y biotecnología para la implementación experimental final. Para facilitar esta tarea, los equipos participantes tienen a su disposición una enorme colección de piezas genéticas, que, como materia prima de base, pueden ensamblar mediante unos procedimientos estandarizados (conocidos como sistema de BioBricks). Esta colección crece año tras año, nutriéndose de las aportaciones de nuevas piezas desarrolladas por los grupos participantes.

Sin género de dudas, esta obra ofrece una excelente guía para adentrarnos en un mundo sorprendente donde tendrán lugar los grandes avances de este siglo.

—Javier Macía Santamaría
Instituto de Biología Evolutiva
(CSIC-UPF)



EARTH'S DEEP HISTORY. HOW IT WAS DISCOVERED AND WHY IT MATTERS

Por Martin J. S. Rudwick. The University of Chicago Press, Chicago, 2015.

La Tierra

Descubrimiento de un largo pasado

Martin Rudwick puede considerarse maestro de historiadores de las ciencias de la Tierra. Profesor emérito de historia en la Universidad de California en San Diego, vinculado también al departamento de historia y filosofía de la Universidad de Cambridge, de su copiosa obra recordemos *Bursting the limits of time: The reconstruction of geohistory in the age of revolution* y W*orlds before Adam: The reconstruction of geohistory in the age of Reform*. En el título de reseña, el lector encontrará su pensamiento decantado en un lenguaje asequible sin excursos ni academicismos para iniciados. Además, es un texto valiente, libre de prejuicios y de sumo interés en un tiempo en que la intervención humana amenaza con cambiar el curso de la evolución terrestre.

Al pensar en las ideas sobre la antigüedad de la Tierra, inevitablemente nos viene a la mente James Ussher, quien, en el siglo xvii, fechó la edad de la creación del mundo en el año 4004 a.C. La exposición, habitual por entonces, de quien fuera arzobispo y protegido del rey Jacobo I de Inglaterra (y VI de Escocia), recibió ya oportunas críticas en los siglos xviii y xix, cuando se empezaron a estudiar rocas y fósiles, montañas y volcanes, considerados archivos naturales de la historia de la Tierra. Opuesto a la tesis fundamentalista del creacionismo, Rudwick rechaza de plano la presentación arraigada de esa historia como un conflicto entre religión y ciencia, y demuestra que la explicación que la geología moderna da de la historia profunda de la Tierra hunde sus raíces en la cultura judeocristiana.

Sostenía Sigmund Freud que se dieron tres grandes revoluciones que transformaron el significado de la presencia del hombre en el mundo. La primera había desalojado a la Tierra del centro del universo, convirtiéndola en un planeta más, en órbita alrededor de una estrella común. La segunda revolución había integrado a nuestra especie en el resto del mundo animal, entre los primates, perdiendo la condición de creación especial de Dios. La tercera nos despojó de la racionalidad para poner en primer plano las fantasías subconscientes. Cada cambio portaba asociado un nombre: Copérnico, Darwin y Freud.

Stephen Jay Gould añadió a la lista una cuarta revolución, segunda en orden histórico: la extensión de la escala temporal de la Tierra y la dilatación astronómica de la escala espacial del universo. Buena parte de ese tiempo profundo descubierto antecedió a la presencia humana. La secuencia de un período no humano, seguido por un período humano, confería a nuestro planeta un carácter histórico. La naturaleza tenía su propia historia sin la presencia del hombre. Rudwick reconstruye esa historia profunda de la Tierra y del lugar que ocupa el hombre en la misma, consciente de que la historia humana, y no la física o la astronomía, se convirtieron en el modelo para trazar la historia de la naturaleza. La Tierra no estaba programada de suerte tal que su pasado y su futuro se hallaran plenamente determinados, dadas unas condiciones iniciales y las leyes inmutables de la naturaleza. Se mantenía, por supuesto, que las partes componentes de la naturaleza terrestre operaban de acuerdo con leyes universales y fijas.

En la edad de la revolución científica, de Galileo y Newton, era opinión acepta-

da que la humanidad tenía la misma edad que la Tierra. Ni el cosmos ni el propio tiempo eran mucho más antiguos que el hombre. Parecía de sentido común que el mundo tuvo que haber sido un mundo humano, aparte del breve preludio en el que se pusieron las condiciones para la presencia del hombre. Se admitía sin discusión el relato del Génesis sobre la creación de un mundo preparado para el advenimiento del hombre. Cuando los historiadores del siglo xvii calcularon que la semana de la creación había comenzado con un día específico del año 4004 a.C., la fecha podía ser cuestionada, y, de hecho, lo fue, pero la precisión ansiada, no. Pero Ussher no era un fundamentalista protestante al estilo del creacionismo actual, sino un estudioso riguroso que se desenvolvía de acuerdo con los parámetros de la ciencia de su tiempo. Se ocupaba de la cronología, ciencia que se proponía construir una historia del mundo exacta, compilada a partir de los textos disponibles, sagrados y seculares, que incluía registros de fenómenos naturales (eclipses, cometas y «nuevas estrellas» o supernovas).

Ussher manejó fuentes hebreas, griegas y latinas. Le había precedido en la tarea Joseph Scaliger, quien agregó fuentes árabes. No se habían descifrado todavía los jeroglíficos egipcios. De esa variopinta colección de fuentes obtuvieron un repertorio de datos multiculturales y multilingüísticos. La propuesta de Ussher de señalar el año 4004 a.C. como el origen del mundo era una más entre muchísimas, que se movieron entre 4103 y 3928 a.C. Scaliger lo había fijado en 3949 a.C., e Isaac Newton en 3988 a.C. Lo mismo que otros cronólogos, Ussher subdividió los milenios en épocas y estas en edades o períodos.

El Diluvio Universal se consideraba un hecho histórico incontrovertible. De acuerdo con los cálculos de los cronólogos hubo de suceder entre un milenio y 500 años desde la aparición del hombre. En el arca se habían refugiado Noé y su familia; por eso interesaba, y mucho, lo que le sucedió a la humanidad antes de ese episodio. Entre los muchos autores que analizaron y comentaron el Diluvio destacó Athanasius Kircher, cuyo famoso *Mundus Subterraneus*, publicado en 1668, describía la Tierra como un sistema complejo y dinámico, aunque no producto de la historia. Suponía que los fenómenos superficiales (los volcanes) estaban relacionados con estructuras del interior del planeta. En su *Arca de Noé*, aparecida en 1675, Kircher analizó el Diluvio mediante un examen exhaustivo de todas las fuentes disponibles. Calculó hasta cuánta agua fue necesaria para subir por doquier el nivel de las aguas. Conjeturó que la distribución de continentes y océanos pudo haber sido distinta antes del Diluvio.

La propia naturaleza había construido sus propios objetos, distintos de los artefactos humanos. Así, las conchas que aparecían a veces en lo alto de un monte. Para los eruditos de la revolución científica esas conchas indicaban que en otro tiempo el mar se extendía mucho más lejos de los límites actuales. Y eso solo pudo ser, pensaron, con el Diluvio.

El caso de los fósiles resultaba ilustrativo. El término no solo aludía, en el siglo xvii, a los organismos fosilizados, sino a multitud de objetos enterrados y sacados a la luz. Los fósiles que llenaban los anaqueles de los gabinetes de los naturalistas abarcaban una mezcolanza heterogénea de objetos: desde cristales de cuarzo y otros minerales en un extremo del espectro hasta conchas marinas, en el otro, pasando por objetos que guardaban parecido con plantas, animales o partes de ellos. Creíase que existía una estrecha analogía entre el mundo inorgánico y el vivo. El mundo inerte producía a veces figuras caprichosas que nunca se pensó correspondieran a seres antaño vivos.

Dos de tales estudiosos, cuyos trabajos sobre los fósiles marcaron el camino, fueron Nils Stensen y Robert Hooke. En 1667 Stensen publicó un breve informe sobre su disección de la cabeza de tiburón. En la disertación incluía una digresión sobre fósiles *glossopetrae*, objetos en forma de lengua —de ahí el nombre—, semejantes a los dientes de tiburón, pero mucho mayores. Eran de piedra y se hallaban incrustados en la roca. Publicó un esbozo de un tratado sobre fósiles (*Prodromus*, 1669). Pese a tan breves escritos, sus ideas fueron debatidas en toda Europa. Llegaba a las mismas conclusiones expuestas por Hooke en su *Micrographia* (1665). Ambos concedieron naturaleza orgánica a los fósiles. La naturaleza no hace nada en vano y, por tanto, los objetos que posibilitaron la vida de tiburones, bivalvos o árboles no fueron formados por la naturaleza para terminar englobados en una roca. Para rechazar que hubiera analogía entre lo inorgánico y lo orgánico, Stensen analizó el desarrollo de un diente de tiburón y el de un cristal.

Ni las *glossopetrae* descritas por Stensen ni los ammonites analizados por Hooke les llevaron a cuestionar la escala del tiempo del planeta que daban por cierta entonces los académicos dedicados a la cronología. Tampoco pusieron en duda que casi todo ese intervalo de tiempo había sido historia humana. Stensen utilizó rocas y fósiles para reconstruir una secuencia histórica de acontecimientos naturales. Los ajustó al relato del Génesis y del Diluvio. En las colinas de los alrededores de Volterra observó dos conjuntos de rocas bien distintos: uno sobre otro; cada conjunto constaba de varios estratos horizontales en unos tramos e inclinados verticalmente en otros. De ello dedujo que, en el pasado, se habían ido depositando lechos horizontales uno sobre otro, aunque más tarde, en determinados sitios, colapsarían y darían origen a la configuración inclinada. El conjunto superior contenía conchas fósiles; el conjunto inferior, obviamente más antiguo, carecía de fósiles. Por tanto, dedujo, el conjunto inferior procedía del tiempo de la Creación, cuando no había seres vivos, mientras que el superior procedía de un período posterior, probablemente del tiempo del Diluvio. El relato bíblico concordaba con lo observado en la naturaleza.

La inmensa escala temporal de la Tierra no podía ser apreciada en sus justos términos estudiando los fósiles en el gabinete y mucho menos con la información libresca. La posibilidad de una historia altamente extendida de la Tierra, casi toda ella prehumana, resultaba más convincente para aquellos naturalistas que habían visto por sí mismos, en el campo, el escalonamiento de estratos de formaciones rocosas y el tamaño de los grandes volcanes. Coincidía con que a finales del siglo xviii muchos Gobiernos de Europa fundaron academias de minas para la formación de personal experto en beneficio de los metales. Se necesitaba conocer la estructura de las rocas subyacentes para abrir nuevas minas o soterrar los pozos explotados. A ese saber se le llamó geognosia. Abraham Werner, profesor de la Academia de Minería de Freiberg, publicó en 1787 una *Breve clasificación y descripción de las diferentes especies de rocas*. Se proponía poner orden en un mundo disperso y heteróclito.

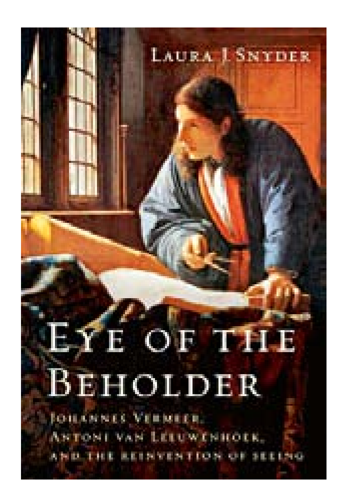
Los volcanes constituían otro fenómeno natural con el que había que enfrentarse en el trabajo de campo. William Hamilton hablaba de series de erupciones

volcánicas del Vesubio y del Etna de tiempos antiquísimos, cuyos elevados conos de cenizas y ríos de lava se fundaban sobre rocas mucho más antiguas. Sin duda, la historia de la Tierra se prolongaba muy atrás en el tiempo. Razonamiento que recibió un sólido espaldarazo con el descubrimiento, por Nicolas Desmarest, de volcanes extintos en el Macizo Central de Francia. Werner y Desmarest aparecen como antagonistas en una controversia clásica entre neptunistas y vulcanistas, recogida en todos los manuales.

A las clases de Buckland en Oxford asistió Charles Lyell. Comenzó publicando artículos en *Quarterly Review* sobre los descubrimientos recientes de los geólogos. Se sintió seducido por la tesis de John Playfair sobre la fuerza de las causas y procesos actuales para explicar la conformación de la Tierra a lo largo de la historia. Pensaba que Cuvier, a quien admiraba, se había precipitado al prescindir de esa explicación para dar cuenta de las extinciones en masa y otras grandes revoluciones súbitas del pasado. Visitó Francia, Italia y España —aunque Rudwick omite este último— para estudiar volcanes extintos. En nuestra patria recorrió la zona volcánica de Olot. De vuelta a Inglaterra escribió su obra imponente en tres volúmenes, *Principles of Geology* (1830-33). Propone un sistema explicativo basado en la uniformidad absoluta, sin tendencias direccionales ni catástrofes excepcionales. El modelo de Lyell ejerció una poderosa influencia en Charles Darwin, quien, como es sabido, dio sus primeros pasos naturalistas en el campo de la geología.

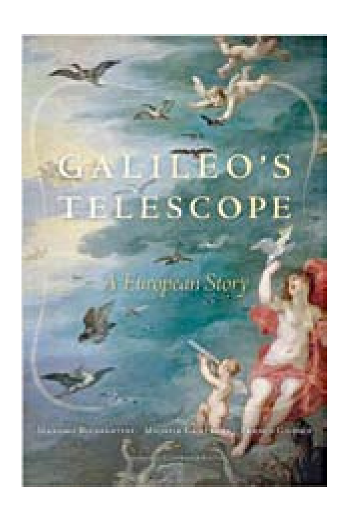
Los geólogos del siglo XIX realizaron progresos espectaculares en la reconstrucción de la historia de la Tierra. John Phillips compendió ese saber en su «Geological scale of time», publicada en su *Life on the Earth* (1860). Distinguía entre períodos, sistemas y organismos (*life*) correspondientes. Tres eran los períodos: Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. Los sistemas del Paleozoico se escalonaban, de abajo arriba, en Cámbrico-Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico; en ese período habitaron invertebrados, plantas terrestres, peces y reptiles. Tres sistemas cubrieron el Mesozoico, donde aparecen los mamíferos marsupiales: Triásico, Oolítico y Cretácico. Por último, en el Cenozoico llegan los mamíferos placentarios y, por fin, el hombre, este durante el último sistema, el Pleistoceno, que vino precedido por el Eoceno, el Mioceno y el Plioceno. La Tierra tendría, para Phillips, 90 millones de años.

—Luis Alonso



EYE OF THE BEHOLDER: JOHANNES VERMEER, ANTONI VAN LEEUWENHOEK, AND THE REINVENTION OF SEEING.

Por Laura J. Snyder. W.W. Norton, 2015.



GALILEO'S TELESCOPE: A EUROPEAN STORY.

Por Massimo Bucciantini, Michele Camerota y Franco Giudice. Traducción al inglés de Catherine Bolton. Harvard University Press, 2015.

El ojo asistido

Dos estudios sobre el modo en que los instrumentos ópticos enseñaron a ver a la ciencia

En el siglo XVII los científicos aprendieron a ver, y así descubrieron lo astronómicamente grande y lo que, de puro pequeño, era invisible. En las primeras décadas se habían inventado, por separado, el telescopio y el microscopio. Sus revelaciones dejaron a la intelectualidad europea asombrada, divertida y nerviosa.

En *Eye of the beholder* («El ojo del observador»), la historiadora Laura Zinder describe lo que el mercader de telas Antoni van Leeuwenhoek intuyó gracias al uso del microscopio. Con los que él mismo construyó, de una resolución de un micrómetro, halló que las gotas de lluvia hervían de vida. En *Galileo's telescope* («El telescopio de Galileo»), los historiadores de la ciencia Massimo Bucciantini, Michele Camerota y Franco Giudice ofrecen un nuevo relato de cómo el mundo descubrió, gracias a Galileo, el poder que el telescopio tenía de desentrañar los cielos. Cuentan la génesis e influencia del librito que Galileo publicó en 1610, el *Sidereus nuncius* («El mensaje — o mensajero— de los astros»). Estos dos detallados estudios muestran cuán grande fue la sensación causada por el descubrimiento de mundos imperceptibles a simple vista.

Snyder explora, además, los paralelismos entre los intereses de Leeuwenhoek y los del artista Johannes Vermeer. Ambos eran de Delft, ambos se valieron de las lentes con un propósito distinto: Leeuwenhoek, para satisfacer una curiosidad insaciable; Vermeer, para ampliar su capacidad de percibir y registrar el mundo, por ejemplo con una cámara oscura. ¿Compartieron conocimientos como conocidos, incluso como amigos? Leeuwenhoek fue el albacea de Vermeer; puede que se tratase del deber cívico de un comerciante prominente, pero, según explica Snyder, las otras, contadas, veces en que se encargó de una tarea así había lazos que le unían al finado.

Se ha conjeturado que el sabio de dos de los cuadros de Vermeer de los años sesenta del siglo XVII (con un mapa y un compás en *El geógrafo*, con un globo celeste en *El astrónomo*) era Leeuwenhoek. Los retratos de este que se conocen son de una época posterior, así que cuesta juzgar

el parecido. Snyder no zanja la cuestión. Solo puede hacer cábalas sobre si Vermeer no inspiraría a Leeuwenhoek el uso de lentes para algo más que determinar la calidad de los tejidos.

No obstante, es bella la evocación que ofrece del ambiente de Delft a finales del siglo XVII, «donde un carnicero complaciente le vendía a Leeuwenhoek ojos de vaca, testículos de liebres y otras muestras que le solicitaba». Snyder resulta reveladora acerca de los fines y métodos de Vermeer, y así ayuda a explicar por qué sus obras son tan hipnóticas. Esto hizo que saliera corriendo a examinar los «reflejos especulares» del pan en *La lechera*, logrados con una refinada superposición de capas de pigmentos. «Vermeer pintaba como de verdad ve el ojo, no como la mente cree que ve», escribe.

Esa diferenciación subyace a ambos libros y condensa la disputa acerca del significado que tenían las observaciones. A veces se presupone que la introducción de nuevos instrumentos no planteó problema alguno a nadie, salvo a los intolerantes y los ignorantes. La verdad es que los primeros telescopios y microscopios no desvelaban gran cosa. Había que «entrenar el ojo» antes de poder interpretar lo que se veía.

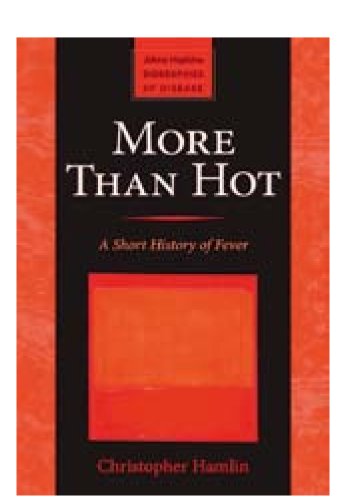
Samuel Pepys reconocía en su diario «una gran dificultad antes de que podamos [ver] algo» con el microscopio que compró tras leer la descripción del filósofo natural Henry Power en 1664. Hasta a Robert Hooke, cuando la Sociedad Regia le pidió que verificase las aseveraciones de Leeuwenhoek, le resultó difícil usar los microscopios de una sola lente preferidos por el mercader, que daban más aumentos que los microscopios compuestos que Hooke había utilizado en su *Micrographia* (1665). Y Galileo se preguntaba, cuando, al desplazarse Saturno, sus anillos se veían con menos claridad, si el instrumento no le estaría engañando. Hubo debate acerca de la fiabilidad de esos aparatos. La óptica tenía unos vínculos poco respetables con la magia: el napolitano Giambattista della Porta, que había perpetuado la asociación en su libro *Magia natural*, de 1558, rechazó en un principio las aseveraciones de Galileo —y de paso se atribuyó la invención del telescopio—: «En cuanto al secreto del anteojo, lo he visto, y es una bobada».

Tanto Leeuwenhoek como Galileo eran dados al secretismo y a ser posesivos con sus instrumentos. Galileo aprendió a tallar lentes para que sus instrumentos fuesen mejores que los holandeses (se basó en descripciones verbales). Pero se empeñó en mantener sus propios telescopios lejos de los rivales: hizo oídos sordos a los ruegos de Johannes Kepler, con quien estaba en buenas relaciones. Y apenas se conocía cómo funcionaban. Galileo escribía a la ligera en el *Sidereus nuncius* que había perfeccionado el instrumento «basándose en la ciencia de la refracción»; sin embargo, Kepler sería el primero en dar una buena enunciación de esos principios en su *Dioptrice* de 1611.

Galileo's telescope se limita al período en que Galileo se hizo famoso gracias a sus descripciones de la superficie de la Luna, de la Vía Láctea «espolvoreada con estrellas» (en palabras del escritor John Milton) y de las lunas de Júpiter, a las que llamó estrellas medíceas para halagar a Cosme II de Medici, su protector. El problema que esta complejidad planteó a la cosmología tradicional presagiaba las tormentas teológicas venideras. Como dicen los autores: «Si el cielo estaba sujeto a generación y corrupción, ¿podía seguir siendo el hogar de los ángeles y los santos?». *Galileo's telescope* no es de fácil lectura: haber aportado más contexto en medio de los detalles tan profusamente investigados habría venido bien; no dice tampoco mucho acerca de cómo moldeaban la personalidad de Galileo los debates en que participaba. Pero ambas obras proyectan la sensación de que los nuevos modos de ver, lejos de limitarse a ofrecer nuevos instrumentos, eran —y son— complicadas extensiones del modo en que entendemos nuestra experiencia.

—Philip Ball

Reseña original publicada en *Nature* vol. 520, pág. 156, 2015. Traducida con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015



MORE THAT HOT. A SHORT HISTORY OF FEVER.

Por Christopher Hamlin. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2014.

Fiebre

Significado médico, social y cultural

La obra magistral de Christopher Hamlin aborda una experiencia común, la fiebre, en su amplia diversidad y significación. Dibuja una secuencia diacrónica de la evolución de la sanidad a través de la vivencia de esa condición. El autor, docente en la Universidad de Notre Dame, ha publicado ya otros libros de historia social de la medicina, como *Public health and social justice in the age of Chadwick: Britain, 1800-1854* y *Cholera: The biography*.

Mucho antes de que el termómetro comenzara a medir la temperatura, el hombre conocía ya la fiebre como un estado peligroso, aunque transitorio, del organismo. Constituía la forma más familiar de pérdida del control sobre uno mismo, alienación que no solo preocupaba al paciente y a su entorno inmediato, sino también a la sociedad entera. Andando el tiempo, el concepto globalizador e indefinido de fiebre se partiría en dos: las «fiebres», que designaría enfermedades epidémicas peligrosas y a menudo exóticas, y «la fiebre», un estado fisiológico curioso, desasosegante, aunque benigno por lo común. A finales del siglo XX, esa divergencia dividía al mundo entre un sur global profundamente afectado por fiebres (malaria, sobre todo) y un norte donde la fiebre, aupada ahora a la categoría de mero síntoma, resultaba tan médicamente trivial, que pasaba a integrarse en un elemento más de la cultura popular.

Historiadores de la medicina y sociólogos, demógrafos y epidemiólogos califican enfermedades del pasado, aunque raramente en los términos en que sus protagonistas las entendían. Descripciones y terminología del pasado no cursan fácilmente con las categorías y marcos de entendimiento de nuestro tiempo. Nadie habla ahora de «calenturas» o expresiones similares. Pensamos ya en criterios clínicos vinculados al mecanismo subyacente: microorganismo causante, mal funcionamiento del riñón o mutación génica.

La fiebre es hoy un síntoma, no una enfermedad. Pero a lo largo de su historia escrita fue una realidad omnipresente y proteica, que amenazaba con la incapacitación, con la muerte incluso, si no se atajaba. Constituía una parte inevitable de la experiencia doméstica diaria. Antes de la segunda mitad del siglo xix, las fiebres incluían una percepción sensorial exacerbada y una sensación de ardor que, a veces, se acompañaba de escalofríos, desorientación y delirios. Algunas fiebres presentaban un curso intenso y breve; otras duraban tiempo, provocando una historia clínica de ansiedad y angustia, antes de que el paciente se restableciera o muriera; unas se asociaban a lesiones de la piel; otras no. Y las había que manifestaban características de lo que un médico moderno podría denominar picos febriles recurrentes.

No es fácil delimitar, distinguir, clasificar y comprender el dominio inmenso de la febrilidad. Los nombres de las enfermedades arrastran el peso de una larga tradición. Se han tomado muchas enfermedades para ejemplificar la fiebre, algunas con la fiebre en el nombre (fiebre tifoidea y fiebre del dengue) y otras sin incluirla (neumonía, malaria, gripe y peste, reputadas a menudo las fiebres más graves). La comprensión de las causas de la fiebre y su patología es adquisición reciente, aunque sobre ella se ha venido escribiendo desde los inicios de la ciencia. La fiebre a menudo es una versión extrema de normalidad. («De vez en cuando me noto caliente, cansado, con dolor de cabeza. Tal vez he comido con desmesura o me he expuesto demasiado tiempo al sol.») Pero las patologías febriles pueden ser estados muy específicos, entidades exógenas, distintas de la variabilidad normal.

Son muchos los conceptos genéricos de fiebre que aparecieron en sistemas médico-filosóficos de la antigüedad clásica y han persistido a lo largo de milenios. En la India, China y Grecia, los médicos reconocían distintas malarias, fiebres que se repetían en ciclos de uno, dos o tres días, lo que en la literatura latina pasarían a denominarse fiebres cuotidianas, tercianas y cuartanas, respectivamente. En la medicina hindú, «fiebre» es principalmente un concepto organizador. En la definición de fiebre de la saga médica Susruta constaba de cuatro elementos: transpiración entrecortada, calor, dolor y hormigueo de las extremidades. Se la denominaba «el señor de los achaques», porque es el rey de la destemplanza absoluta del organismo en su integridad, una condición indispensable para que nazca

un nuevo ser o pueda partir de esta vida. Solo los dioses y algunos humanos pueden vencer ese calor. Los textos chinos hablan de una fiebre genérica grave, pero esa descripción queda recortada en su interés patofisiológico. La medicina china distinguía entre trastornos de frío y trastornos de calor. Los autores de la colección hipocrática, unos setenta libros compuestos en el siglo posterior a 430 a.C., se ocuparon de fiebres peculiares de ciertas estaciones, fiebres que resultan de las heridas y fiebres de la vida ordinarias (exceso de ejercicio). Emplearon el término griego *pyretos*, que procede de *pyr*, «fuego». Lo mismo que el fuego, la fiebre consume, produce calor y se propaga.

Los autores hipocráticos se fijaron con un mayor detenimiento que los médicos hindúes y chinos en los aspectos delirantes del habla y del comportamiento. Hasta el siglo XVIII no volvería a resurgir la atención sobre el delirio. En la medicina hipocrática y china, la denominación y clasificación de las enfermedades importaba menos que comprender los procesos internos de la enfermedad. Los autores de las *Epidemias* registran la secuencia de síntomas. También hindúes y chinos e hipocráticos atendieron al curso temporal de la fiebre. Los hipocráticos, en particular, se concentraron en los días críticos.

Pese a los profundos cambios registrados en medicina en el medio milenio que separa a Hipócrates de Galeno (128-200 d.C.), se les asocia en la creación de la teoría de los cuatro humores, que hicieron suya islamistas y occidentales a lo largo de otro milenio entero. Lo mismo que en los textos hipocráticos, la fiebre sería la enfermedad paradigmática para Galeno y sus seguidores. Los cuatro humores fundamentales eran la sangre, la flema, la bilis amarilla y la bilis negra. En un cuerpo sano se mantenían en equilibrio. Los cuatro humores, con los cuatro temperamentos resultantes, se relacionaban con los cuatro elementos (tierra, aire, fuego y agua) y las cuatro cualidades (caliente, frío, húmedo y seco). Distinguían, asimismo, cuatro fiebres con su vinculación respectiva: la continua con la sangre, la cuartana con la bilis negra, la terciana con la bilis amarilla y la cuotidiana con la flema.

En la reflexión sobre la fiebre sobresalieron luego, durante el tránsito a la modernidad, Santorio Santorio, Thomas Willis, Lorenzo Bellini, Friedrich Hoffmann, Thomas Sydenham, Johan Baptista van Helmont, James Thomson, Robert Talbor y Herman Boerhaave. Fue Santorio profesor de medicina en la Universidad de Padua; estudió el pulso y la temperatura corporal y publicó en 1614 una *Medicina Statica*, donde reseñaba sus experimentos sobre la transpiración. En *Two medico-philosophical diatribes* (1621-1675), Willis desarrolló un concepto general sobre la fermentación y lo aplicó a las fiebres. Sostenía que la fermentación reflejaba una tendencia innata de los materiales a disociarse en sus componentes (tierra, agua y los *tria prima* de los alquimistas, a saber, sal, azufre y mercurio).

Bellini publicó en 1683 *De Febribus*, un manual donde deducía, a partir de primeros principios, la mecánica del flujo sanguíneo y los fenómenos de la fiebre en el marco de una mecánica de fluidos. La teoría de Hoffmann sobre la fiebre se fundaba en principios cartesianos: igual que en la cosmología de Descartes, los vórtices daban cuenta del cambio, en el que unas partículas caían en la periferia y otras en el núcleo; en la fiebre, las partículas de la sangre se concentrarían en el centro del organismo y, bajo comprensión, borbotaban, produciendo la aceleración del pulso y el calor percibido. Con su compañero Georg Ernst Stahl, convirtió la Universidad de la Halle en avanzadilla de la medicina académica de la Alemania protestante.

A comienzos del siglo XIX, el concepto de fiebre inició el camino hacia su consideración moderna

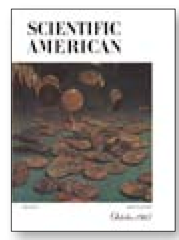
La doctrina del primer libro de Sydenham sobre el particular, *Methodus curandi Febres* (1666), la desarrolló en *Medical observations on the history and cure of acute diseases* (1675). Aunque la fiebre variaba estacionalmente, el carácter predominante de la misma cambiaba cada ciertos años. Las cinco epidemias sucesivas sufridas en Londres entre 1660 y 1675 se debieron, primero, a una terciana; le siguieron episodios de peste, cólera, viruela y disentería.

Para van Helmont y sus seguidores, la fiebre constituía otro motivo para atacar la medicina oficial de las escuelas, en particular el galenismo: la fiebre no se debía al calor corporal, ni a humores pútridos. El cuerpo humano se halla bajo control del «arqueo», responsable de la salud y la fiebre. Para su seguidor Thompson, autor del diálogo *Helmont disguised on*, publicado en 1657, el arqueo era un regulador arbitrario e implacable. Talbor publicó en 1672 *Pyretologia*, donde introduce en medicina los beneficios de la filosofía experimental en conjunción con el legado de Hipócrates: se trasladó a Essex para observar y experimentar con las fiebres cuartanas, allí frecuentes. A Galeno le emuló Boerhaave en su tendencia a inventariar malfunciones posibles. Se mostraba proclive a considerar cualquier enfermedad como una composición o serie de malfunciones: ojos que no podían ver, oídos que no podían oír, estómagos que vomitaban. Boerhaave se adelantó a enfoques posteriores. En primer lugar, se centró en los nervios; había una fuerza nerviosa que enardecía la sangre. Reconoció las toxinas como causas remotas, y se preocupó de la temperatura.

La emergencia del enfoque centrado en los nerviosos a lo largo del siglo XVIII fue, en parte, resultado de la búsqueda de explicación última del carácter oscilatorio de la fiebre. A comienzos del siglo XIX, el concepto de fiebre inició el camino hacia la consideración moderna de la misma. Se hizo plural; había distintos tipos de fiebre. Esas diferencias de naturaleza se atribuían al agente causante. En las postrimerías de la centuria, se conocía el papel transmisor de insectos. La microbiología estaba asentándose. Un ejemplo arquetípico se nos ofrecerá con la fiebre tifoidea, cuyo microorganismo (la bacteria *Salmonella typhi*) fue descubierto en los años ochenta de esa centuria por Karl Josep Eberth. Carecía ya de sentido ceñirse a una característica única y global. Patología y bacteriología, las herramientas del laboratorio, habían acotado entidades definidas por mecanismos y el curso clínico. El termómetro y los antipiréticos habían ayudado a acotar la experiencia antigua de la fiebre en nuestra fiebre: síntoma presente en diversas afecciones, definida por un criterio métrico de una columna de mercurio. Hacia 1920 ya se habían identificado la mayoría de los agentes microbianos, su ciclo biológico y su hábitat. Se cifró el grado de temperatura umbral.

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Octubre 1965

Proteínas del petróleo

«En una planta experimental de Lavera, en Francia, se están obteniendo cantidades considerables de proteína a partir de microorganismos cultivados con una dieta compuesta principalmente de hidrocarburos de petróleo. Tan insólita idea, puesta a prueba por un equipo investigador de la Sociedad Francesa de Petróleos, se ha mostrado tan acertada que hay buenas razones para creer que el petróleo se convierta en un importante recurso alimentario para la creciente población del planeta. ¿Por qué recurrir a él para resolver el problema de la alimentación? A la postre, las reservas de petróleo de la Tierra son limitadas. Hemos calculado que con unos 40 millones de toneladas de petróleo (una pequeña fracción de los 1250 millones de toneladas de crudos producidos en 1962) podrían obtenerse 20 millones de toneladas de proteína pura al año. Consideremos, a efectos comparativos, otra fuente como la pesca marina. Hoy aporta unos 40 millones de toneladas de pescado al año, que representan en torno a seis millones de toneladas de proteína pura.»



Octubre 1915

Exploradores árticos

«Vilhjalmur Stefánsson ha resurgido de los helados témpanos del norte con el relato del descubrimiento de nuevas tierras y, sin apenas dirigir una palabra a un mundo que lo creía muerto, ha vuelto a poner rumbo al norte, donde lo aguardan montañas sin nombre y litorales ni siquiera imaginados. Este comunicado encierra algo más de lo que las meras palabras puedan decir; significa que del fracaso y de las abrumadoras desgracias se arrancó un triunfo, y que los nombres de quienes se perdieron quedarán asociados al de una empresa culminada. No es arriesgado afirmar que ninguna expedición ártica ha vencido un inconveniente inicial tan grande como la de Stefánsson con la trágica destrucción del *Karluk* y la consiguiente pérdida de once vidas.»

Stefánsson descubrió varias islas en el archipiélago ártico canadiense.

Parque cretácico

«El Museo de Historia Natural de la ciudad de Nueva York ya exhibe el esqueleto del animal carnívoro más grande que jamás haya existido. Es el tiranosaurio, el "lagarto tirano", que vivió a finales del Cretácico. Este esqueleto forma parte de un grupo de tres fósiles dispuestos para representar un incidente cotidiano en aquel remoto y hosco pasado (*véase la ilustración*). Tiene lugar a orillas de un lago, en un amanecer de hace tres millones de años. Un tracodonte, dinosaurio herbívoro, que se ha aventurado fuera del agua en busca de un suculento desayuno vegetal, ha sido cazado y en parte devorado por un tiranosaurio, gigante carnívoro. Mientras ese monstruo está agachado sobre el cuerpo de su víctima, desmembrándolo afanosamente, otro tiranosaurio es atraído por la escena.»



LA NATURALEZA, PURA Y DURA CON GARRAS Y DIENTES: Imagen de un *Tyrannosaurus rex*, 1915.



Octubre 1865

La peste bovina

«La enfermedad que en Europa se ha extendido entre el ganado astado sigue, según los últimos informes, descontrolada; sus estragos fueron tan grandes que en muchos lugares de Alemania no se ve ni un solo animal. La enfermedad se propaga rápidamente en cuanto aparece un animal en cualquier distrito y es probable que la transmitan personas que transporten la infección en las ropas. En nuestro país [Estados Unidos] no ha aparecido aún, y no se espera que lo haga. Como no es en absoluto imposible que este mal sea introducido en el país por accidente, descuido o de modo deliberado, el Informe Agropecuario (oficial) sugiere que se ejerza el máximo cuidado con el ganado importado y que se establezca una cuarentena para esas bestias.»

El acero: espina dorsal de la modernidad

«Informa el señor Henry Bessemer que "actualmente hay en Inglaterra no menos de sesenta convertidores ya instalados o en fase de instalación que pueden producir, cada uno, de tres a diez metros cúbicos con una sola carga. En funcionamiento normal, esos convertidores tienen una capacidad de producción total de 5700 metros cúbicos de acero a la semana, un valor quince veces superior a toda la producción británica de acero colado antes de la introducción del proceso Bessemer. El precio de venta medio de ese acero es al menos 20 libras por metro cúbico inferior al que se vendía el acero colado."»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIII, N.º 15, 9 DE OCTUBRE DE 1915

MONOGRÁFICO ESPECIAL

Cien años de RELATIVIDAD GENERAL

Hace un siglo, Einstein cambió las reglas de nuestra realidad. Para celebrar el centenario de su trascendental obra, Investigación y Ciencia ha reunido en un monográfico especial a expertos de la talla de **J. M. Maldacena**, **J. M. Sánchez Ron**, **B. Greene**, **W. Isaacson**, **S. Hossenfelder**, **L. M. Krauss**, **D. Psaltis** y **S. S. Doeleman**. Descubre cómo se forjó este hito científico y el profundo impacto que sigue ejerciendo en campos como la física teórica, la astronomía y la cosmología.

Incluye el artículo sobre la teoría unificada que el propio Einstein escribió para Scientific American *en 1950*

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*, *¿Estamos al borde de una guerra espacial?* y *El ojo asistido*; Andrés Martínez: *Apuntes*, *Sordera oculta* y *Animales en red*; Carlos Lorenzo: *La especie más invasora*; Juan Pedro Adrados: *A la caza de gigantes gaseosos* y *Vigilancia nocturna por satélite*; Fabio Teixidó: *Olas destructivas en el Ártico*; Luis Bou: *El nuevo rumbo de Pisa*; Xavier Roqué: *Los animales como colonias de organismos*; Mercè Piqueras: *El reto de enseñar evolución a estudiantes musulmanes*; Alberto Ramos: *Planeta disco duro* y *Una geometría aleatoria en la esfera*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España